INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

TECNICAS DEL FUTURO

NOVIEMBRE 1995 - 1000 PTAS.



Noviembre de 1995 Número 230

SECCIONES

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Tom Draper

Página	Fuente
10-11	David Scharf
12-14	Charles O'rear
15	Henryk Temkin AT&T Bell Laboratories
16	Richard Pasley
17	P. J. Griffiths, *Magnum*
18	Richard Pasley
19	P. J. Griffiths, *Magnum*
20-22	Michael Goodman
24	Jason Goltz
25	Laurie Race (*dibujos*), Steven E. Sutton, *Duomo* (*fotografía*)
28-29	Michael Goodman
30	Pattie Maes
34-34	Murray & Associates/Tony Stone Images
36-37	Tony Stone Images
40	Thyssen Henschel (*arriba*), Alsin Nogues, *Sygma* (*abajo*)
41	Georges Retseck
42-43	Dominik Obertreis, *Bilderberg*
44	Mercedes-Benz
45	Dominik Obertreis (*arriba*), Michael Rosenfeld (*abajo*)
46	Roger Tully, *Tony Stone Images*
48-49	Remi Benal, Gamma Liaison; Alan H. Epstein, Pratt&Whitney y David Scharf (*fotos de izda. a dcha.*); Jared Schneidman (*dibujos*)
	Textron Specialty Materials
50	The Boeing Company
51	Slim Films
53	Z. Aronovsky, *Zuma*
54	NASA
55	Alex S. MacLean, *Landslides*
57	Foto de Jerome B. Ratther, Univer-
58-59	sidad de Calgary, coloreada por Andrew P. Leonard y Laurie Grace
60-61	George V. Kelvin
62	Jessica Boyatt
64-65	Roberto Osti
66	David J. Mooney
67	Jared Schneidman/JSD (*dibujo*) y Cygnus Therapeutic Systems
68	Tomo Narashima
69	Nancy J. Alexander
70	Ralph L. Brinster, Escuela de Medicina Veterinaria de la Univ. de Pennsylvania
74-75	David Scharf
76-77	George V. Kelvin (*dibujo*), George M. Whitesides (*fotografía*)
78	George M. Whitesides (*arriba*), Christoph Burki, *Tony Stone Images* (*centro*) y Neil Harding, *Tony Stone Images* (*abajo*)
79	Yuan Lu, Universidad de Harvard
80-81	David Scharf (*fotografía en color*), Universidad de Cornell (*en negro*)
82	Maria Sutton
83	Michael Goodman (*dibujo*), Analog Devices (*fotografía*)
84-85	Dimitry Schidlovsky
86	Etrema Products, Inc.
88	Bob Sacha
89	AP/Wide World Photos
90	Texas Center for Superconductivity, Universidad de Houston
91	Boris Starosta
92	David Scharf
93	American Superconductor
96-97	Barrie Rokeach
98-99	B. Rokeach, Alex S. MacLean, *Landslides* (*recuadros*)
100	Carey Ballard
102	Laboratorio de física del plasma, Princeton
103	Lab. de física del plasma, Princeton (*fotografía*); Laurie Grace (*dibujo*)
104	Roger Ressmeyer, *Starlight* (*arriba*), Carey Ballard (*abajo*)
105	Roger Ressmeyer, *Starlight*
107	Rudi Christensen, *Gamma Liaison*
108	Louis J. Circeo, Instituto de Tecnología de Georgia
109	Karl Gude
110	Bruce Hands, *Tony Stone Images*
111	Miguel L. Fairbanks
112	Roberto Osti
113	Patrick Aventurier, *Gamma Liaison*
114	Maria Sutton
116-117	Composición digital de Tom Draper
126	Susan Bouners
127	Johnny Johnson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Las incertidumbres de la innovación técnica*, *Microprocesadores del año 2020*, *Redes inalámbricas*, *Redes ópticas*, *Inteligencia artificial*, *Programas inteligentes, Realidad virtual* y *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Satélites para el Tercer Mundo*, *Materiales autoensamblantes, Máquinas microscópicas* y *Hace...*; María Birulés: *Tren de alta velocidad, El automóvil: limpio y a medida* y *¿Por qué trasladarse?*; M. A. Gómez Tierno: *Evolución del avión de línea* y *Vehículos espaciales del siglo XXI*; Santiago Torres: *Terapia génica*; Esteban Santiago: *Organos artificiales*; Ana M.ª Rubio: *Los anticonceptivos del futuro*; J. M. García de la Mora: *¿Un futuro mejor?, El negocio de la información, El nuevo puesto de trabajo y Limitaciones de la técnica*; J. P. Campos: *Energía solar* y *Fusión*; Joandomènec Ros: *La ecología industrial del siglo XXI, Técnica al servicio de la agricultura* y *Hacia una ecología económica*; A. Garcimartín: *Materiales inteligentes, Superconductores de alta temperatura* y *La robótica del siglo XXI*; Manuel Puigcerver: *Infraestructuras para la técnica*, *Proyectar el futuro* y *Alfabetización digital*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada 

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 – Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Ya se están fabricando tiendas de oxígeno hechas de tela de etol para prematuros. Todavía en fase experimental, estas tiendas de plástico transparente facilitan una visión completa del bebé.»

«El lanzamiento del DDT para usos civiles generales ha desencadenado una riada de preparados que dicen contener ese insecticida, cuando lo portan excesivamente disuelto para que resulte efectivo. Los productores legítimos del insecticida expresan su temor a que experiencias desafortunadas con primeros preparados incorrectos de DDT, realizados por personas sin escrúpulos, puedan impedir su posterior aplicación para fines más valiosos.»

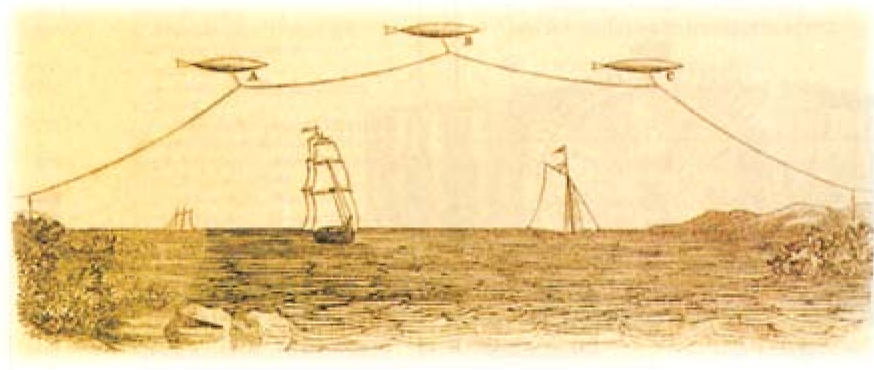
«Las tendencias de la guerra, avanza el general H. H. Arnold, se reducen a tres. Primera, aviones supersónicos; a esas velocidades, serán imposibles los combates aéreos que conocemos. Segunda, desarrollo de los misiles guiados; el perfeccionamiento de sus controles permitiría batir con precisión blancos de dos kilómetros cuadrados, o menos, en cualquier lugar del mundo y desde cualquier lugar del mundo. Tercera, grandes avances en la defensa antiaérea y misiles guiados; cada arma ofensiva nueva genera un arma defensiva y esto sigue siendo cierto aun en el caso de la bomba atómica.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Afirmaba Charles Darwin que la lombriz común, que el hombre desprecia y despreocupadamente pisotea, ha desempeñado en la historia del mundo un papel más importante de lo que la mayoría de las personas se imaginan. A través de los cuerpos de las lombrices pasan y se evacuan a la superficie, en forma de deyecciones, enormes cantidades de tierra. Se ha calculado que en muchos lugares se vierte cada año una capa de excrementos de cinco milímetros de grueso, equivalente a cuatro toneladas por hectárea.»

«Bajo los rifles de los cazadores el búfalo del Oeste no ha tardado en desaparecer. Los cazadores recibían entre 2,50 a 3,50 dólares por cada piel, que se exportaba a industrias peleteras, para fabricar correas de transmisión o arneses y fines similares. Las partidas de caza de más éxito se componían de un cazador y seis desholladores; en la empresa se embarcaron millares de hombres. Sólo en una de las estaciones del ferrocarril de Topeka y Santa Fe se despacharon en un año más de 750.000 pieles.»

«El gobierno federal ha estado experimentando en sus puestos militares con las así llamadas raciones condensadas. Las raciones distribuidas en Fort Logan se componían de café y sopa, solidificados en pequeñas tabletas; el pan era unas tortas aplastadas del peso y la dureza de las piedras. El tocino se presentaba enlatado. Los soldados salieron de marcha y consumieron los alimentos, pero tanto la marcha como la alimentación sufrieron un final repentino cuando más de la mitad de los hombres enfermaron antes de que transcurriera la mitad del tiempo asignado.»



El telégrafo magnético salvando un río

«Escribe E. W. Scripture, de la Universidad de Yale: "He descubierto un método para proyectar imágenes con una linterna de modo que sobre la pantalla se muestren efectos de relieve. Hay que preparar unos lentes con el vidrio de un rojo especial para el ojo izquierdo y un verde especial para el ojo derecho, que se hacen con el vidrio verde que emplean los ferrocarriles. El relieve aparece tan real como en un objeto real. Cuando las imágenes son de tamaño natural, al observador le cuesta creer que no puede avanzar por la sombreada calzada que ve ante sí ni saltar a la embarcación que espera en la orilla"».

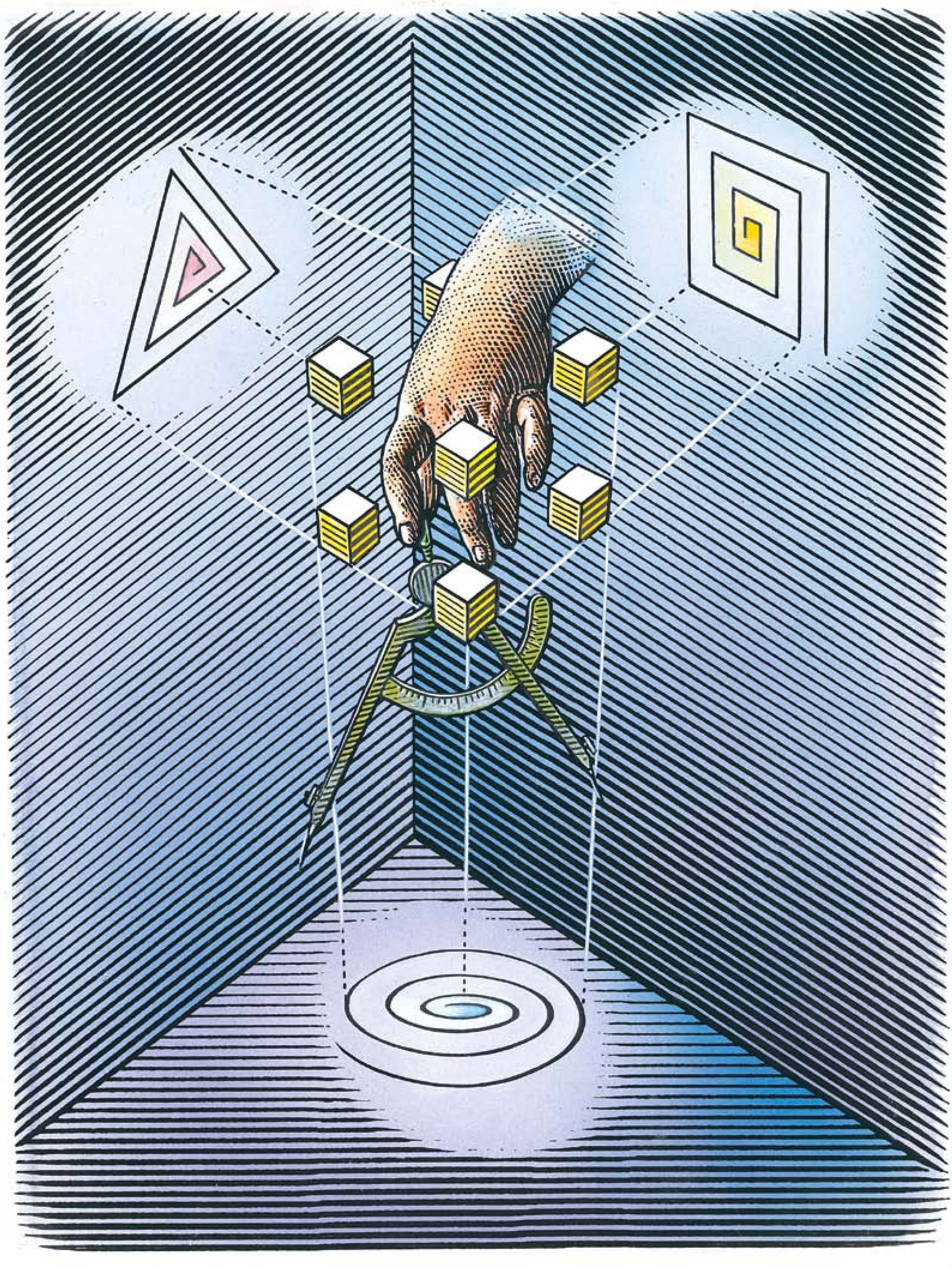
...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El vapor *Britannia* arribó a Boston el jueves pasado, habiendo realizado la travesía desde Europa en quince días. Los relatos acerca del fracaso general de las cosechas de patatas a causa de la úlcera, especialmente en Irlanda, son de naturaleza muy grave y alarmante.»

«Los directores y editores de varios diarios han rechazado los anuncios de tenderos y posaderos que comercien con licores alcohólicos. Así debería ser siempre; y hay que confiar en que todos los directores, especialmente aquellos que abogan por la causa de la templanza, se abstengan de ayudar al comercio de ron admitiendo anuncios de ese jaez.»

«Los periódicos del Oeste se quejan de los estragos de los ladrones procedentes de Nueva York. Será un error, aquí no parece faltar ninguno.»

«Se ha propuesto un nuevo procedimiento para tender las líneas del telégrafo magnético de un lado a otro de ríos y bahías: suspender en alto los cables mediante globos elípticos. Estos, de unos dieciocho metros de longitud cada uno, soportarían unos dieciocho kilogramos cada uno además de su propio peso. Se construirían de tela fina barnizada y se rellenarían de gas. Hasta cada globo se extendería un conducto de tres centímetros y medio de diámetro, mediante el cual podría reponerse ocasionalmente el gas del globo.»



Las incertidumbres de la innovación técnica

Hasta los inventos e ideas geniales pueden tener tropiezos, y por contra, a veces, pequeños avances cambian el mundo

John Rennie

"El futuro ya no es lo que solía," escribió Paul Valéry. No nos cuesta compartir su desencanto. A muchos de nosotros se nos aseguró, de niños, que un día viviríamos en un mundo de maravillas técnicas. El cine, la televisión, los libros y las exposiciones mundiales prometieron que el ocaso del siglo XX y los albores del XXI serían una edad de robots serviciales, coches voladores, colonias lunares, tráfico espacial, ciudades submarinas, videófonos de pulsera, ropas de papel y semana laboral de veinte horas.

Suele aducirse que incluso los pronosticadores mejor informados caen a veces en un desmesurado optimismo acerca de las perspectivas de éxito a corto plazo. Hace veinte años, por ejemplo, la construcción de un corazón artificial autónomo parecía ser meta razonable y factible a corto plazo; no empresa baladí, desde luego, pero sí al alcance. Después de todo, el corazón no es más que una bomba tetracameral; nuestros mejores ingenieros biomédicos habrían de saber construir una bomba. Pero la construcción de una bomba compatible con la delicadeza de los tejidos corporales y la sutileza de sus procesos químicos ha resultado inaccesible. Por muchos conceptos, mejor fortuna han tenido los cirujanos en el trasplante de órganos y a la hora de sojuzgar (por la fuerza bruta de los fármacos) las complejas reacciones de rechazo.

Desde los años cincuenta hasta los setenta, los investigadores en inteligencia artificial confiaban en su capacidad de simulación de otro órgano, el cerebro. Más humildes son en nuestros días: aunque su trabajo ha cosechado algún éxito, como los sistemas expertos en diagnóstico clínico y los grandes maestros de ajedrez electrónicos, se reconoce hoy que la reproducción de algo similar a la auténtica inteligencia humana es mucho más ardua.

Sin embargo, el problema fundamental del que adolecen muchas predicciones sobre la técnica es su simplismo, lo que las hace poco realistas. Una buena técnica tiene, por definición, que ser útil. Ha de poder sobrevivir a las dentelladas del mercado, de las condiciones sociales y económicas, de las políticas gubernamentales, de una deficiente temporización, de los caprichos de la moda y de todas las inconsistencias de la naturaleza y conducta humana. ¿Qué hipotéticos Nostradamus están dispuestos a tener en cuenta tal sinfín de contingencias?

Inventos que resultan inmensamente atractivos en sus propuestas, no son tan felices en la práctica. Uno de ellos es la "mochila reactora" de las historietas de Buck Rogers. En los años sesenta, incentivados por los militares, los ingenieros diseñaron y construyeron diversos prototipos. Gancho de películas como *Operación Trueno*, las mochilas voladoras representaban la encarnación de la libertad que la técnica más osada prometía para el mañana: ir volando al trabajo, a la escuela, al mercado... Pero consideraciones de índole práctica dejaron ancladas en tierra a las mochilas voladoras. Fue el peso del combustible lo que literalmente provocó que la idea se viniera abajo: el necesario para volar una distancia apreciable resultó enseguida excesivo para cargarlo a las espaldas.

Para que una técnica comercial pueda sobrevivir, no sólo ha de funcionar bien: tiene que ser competitiva en el mercado. En los ochenta fueron muchos los analistas convencidos de que la robótica industrial iba a alzar el vuelo. Los directores de las fábricas descubrieron, sin embargo, que la robotización de una línea de montaje implicaba mucho más que sacar las máquinas viejas e instalar en su sitio los nuevos robots. El cambio a robots entrañaba replantearse por completo las operaciones de la planta de manufactura. Fueron muchas las fábricas donde se instalaron robots con buenos resultados, especialmente en la industria del automóvil, pero los directores comprobaron que resultaba más económica la actualización con máquinas no tan versátiles ni inteligentes, aunque con mejor relación rendimiento-precio. (Los expertos discrepan todavía sobre si ulteriores avances en robótica acabarán por inclinar del otro lado la balanza.)

Muchos pronósticos coincidieron en la sustitución de los semiconductores de silicio por dispositivos más veloces construidos con nuevos materiales (arseniuro de galio, por ejemplo) o por nuevas arquitecturas, como los conmutadores superconductores basados en uniones Josephson. Sin embargo, la enorme base de investigación y desarrollo asociada al silicio ha continuado refinando y perfeccionando la técnica existente. Resultado: es casi seguro que el silicio siga siendo el semiconductor preferido, al menos, durante el tiempo que sobreviva la técnica con que actualmente se fabrican los microcircuitos. También sus rivales encuentran ocupación, pero en "nichos" de aplicaciones especializadas.

Entre las presuntas aplicaciones comerciales de los vuelos espaciales se contaba el desarrollo de instalaciones de manufactura en órbita. Teóricamente, la ingravidez permi-

tiría que la fabricación de bolas para rodamientos, la acrecencia de cristales de semiconductores y la purificación de fármacos fuesen mucho más perfectas. Pero el costo de los vuelos espaciales sigue siendo elevado, lo que entraña que la construcción de tales factorías y el acarreo hasta ellas de materias primas no sería ni sencilla ni barata. Y por otra parte, las mejoras en las técnicas utilizadas en tierra continúan devorando las ventajas de la construcción de instalaciones en ingravidez.

También las políticas y las decisiones gubernamentales pueden pesar mucho en el desarrollo de nuevas técnicas. La parsimoniosa lentitud de los gobiernos en lo concerniente a la normalización de equipos electrónicos y a la adjudicación de espectro electromagnético dicta, indirectamente, el ritmo y los resultados en el desarrollo de dispositivos electrónicos. Los contenciosos internacionales sobre la titularidad de los derechos mineros del subsuelo marino han mermado el incentivo para dedicar inversiones a la técnica de minería submarina.

Y en ocasiones, el valor de una técnica no salta a la vista hasta que otros inventos y descubrimientos menores, pero cruciales, lo sitúan en perspectiva. Los ordenadores personales aparentaban ser, durante muchos años, meras curiosidades para aficionados; hasta que Dan Bricklin y Mitchell Kapor inventaron las primeras hojas de cálculo, los ordenadores personales no pudieron demostrar su utilidad en la oficina y en la empresa. Los CD-ROM no han empezado a ser accesorios corrientes en los ordenadores personales hasta que el enorme tamaño de algunos programas, en particular, de las obras de consulta y los juegos interactivos, hicieron de los discos ópticos cómodos sustitutos de los discos flexibles.

En breve: la calidad abstracta de una innovación carece por completo de importancia. Haga mejor lo de siempre, construya una ratonera mejor y quizá todo el mundo venga corriendo hasta su puerta... si tiene la fortuna de que no se fabrique un ratón más astuto ni de que su artefacto quede atascado en las normativas sobre impacto ambiental o de crueldad para con los animales.

Evidentemente, son muchas las técnicas cuyo éxito ha desbordado todas las predicciones. Los transistores, por ejemplo, se tuvieron al principio por meros dispositivos de amplificación de señales de radio y, después, por robustos sustitutos de las válvulas termoiónicas. Sin embargo, siendo por naturaleza dispositivos de estado sólido, resultaba posible fabricarlos en masa y miniaturizarlos hasta límites impensables para las válvulas. Su fiabilidad tornaba factible la construcción de equipos más grandes provistos de un número de componentes mucho mayor. (Resultaría imposible construir un ordenador moderno cuyos conmutadores funcionasen con válvulas en lugar de transistores. No sólo sería demasiado lento a causa de su tamaño, sino que sus docenas de millones de válvulas fallarían con tanta frecuencia que la máquina estaría permanentemente averiada.)

La revolución microelectrónica ha sido fruto de estas ventajas. Podemos referir historias similares para los láseres, las fibras ópticas, los plásticos, los cristales piezoeléctricos y otros elementos indispensables en el mundo moderno. Muy tentador resulta el pensamiento de que la mayoría de las grandes innovaciones resultan imprevistas, por no decir imprevisibles. Así se lo recordaban Whitfield Diffie y John McCarthy en un debate público sobre el futuro patrocinado por SCIENTIFIC AMERICAN: "De haberse celebrado en 1895 un simposio sobre la técnica del siglo XX no se hubieran mencionado ni los aviones, ni la radio, ni los antibióticos, ni la energía nuclear, ni tampoco la electrónica, los ordenadores o la exploración del espacio."

Si tantos peligros y ocultos escollos entraña el vaticinio del futuro, ¿por qué habría INVESTIGACIÓN Y CIENCIA de arriesgar un número a las técnicas clave del siglo XXI? En primer lugar, porque la técnica y el futuro han sido siempre la provincia de esta revista. Hace 150 años, cuando se fundó SCIENTIFIC AMERICAN, la revolución industrial estaba todavía, y en sentido literal, acumulando vapor. Por aquellos días aún no había nacido Edison ni Darwin había publicado *El origen de las especies*; aún no había llegado la teoría microbiana de las enfermedades, ni se había inventado el alto horno y el acero barato, ni se habían descubierto los rayos X; faltaba mucho para las leyes mendelianas de la herencia o para las leyes del electromagnetismo de Maxwell. Esta revista ha tenido el privilegio de informar sobre todos los principales avances técnicos acontecidos desde entonces.

En segundo lugar, parafraseando a Valéry, ahora el futuro no es ni cuando solía ser. El nuevo siglo —por no decir que el nuevo milenio— comienza dentro de menos cinco años (seis, para puristas en calendas). Será dentro de unos pocos decenios cuando las técnicas que ahora existen y que más prometedoras parecen, o bien maduren, o bien se pudran en la vid.

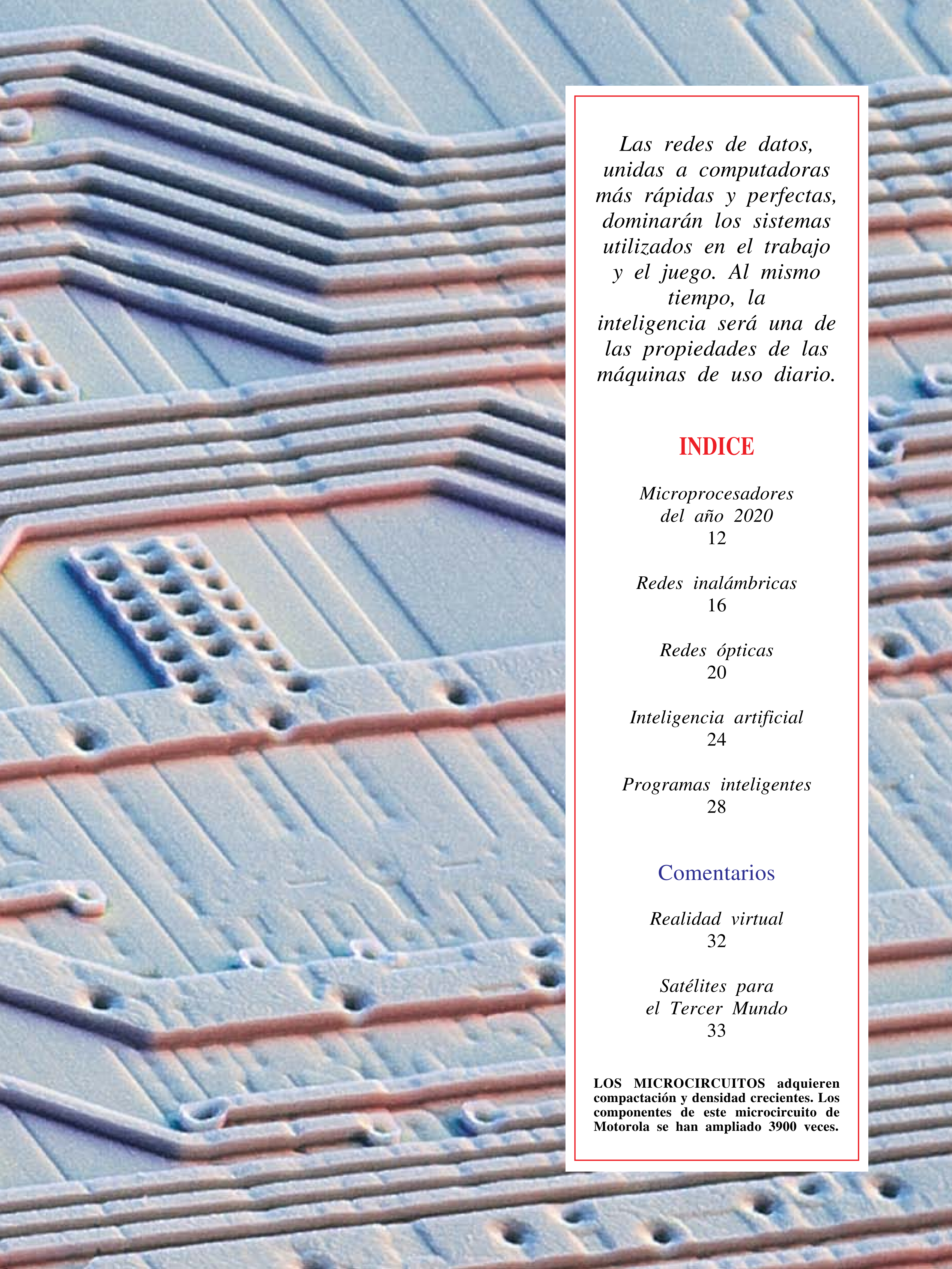
Al seleccionar las técnicas que habrían de figurar en este número optamos por prescindir de las puramente fabulosas y concentrarnos en las que más verosímilmente parecían tener efectos vigorosos y duraderos sobre la vida cotidiana. "¿Cómo?", podrían exclamar ciertos lectores, "¿nada sobre astronaves más veloces que la luz? ¿Qué pasa con las píldoras de inmortalidad? ¿No dicen nada sobre equipos de clonación de uso personal?" Lo sentimos, aquí no tenemos.

La verdad es que al irse acumulando las técnicas unas sobre otras con paso desigual, resulta imposible predecir exactamente cuáles serán las regularidades que afloren. ¿Puede hoy alguien auténticamente prever cómo va a ser el mundo si, por ejemplo, la ingeniería genética madura en toda su medida? Si llega a ser posible la confección de organismos a la medida, capaces de cumplir cualquier función, ¿habrá alguien capaz de conjeturar el aspecto que ofrecerá una fábrica del siglo XXI?

Las nuevas técnicas plantean asimismo dilemas morales, difíciles problemas económicos, crisis de índole personal y social. Por ejemplo, dentro de unos diez años, cuando el Proyecto Genoma Humano haya quedado concluido, le resultarán transparentes a la investigación los fundamentos genéticos de cualquier problema. Los controvertidos aspectos genéticos de la inteligencia, la violencia y de otros rasgos complejos serán entonces susceptibles de escrutinio directo, y, a buen seguro, de manipulación. ¿En qué medida no resultarán transformados el fundamento y el ejercicio de la medicina, el derecho y el gobierno? Por este motivo, además de las piezas mecánicas del desarrollo tecnológico, los lectores encontrarán aquí comentarios de carácter más ensayístico que reflexionan sobre las consecuencias (lo mismo buenas que malas) del trabajo que se está desarrollando.

JOHN RENNIE dirige el equipo de redacción de SCIENTIFIC AMERICAN.


TECNICAS
DE LA INFORMACION



Las redes de datos, unidas a computadoras más rápidas y perfectas, dominarán los sistemas utilizados en el trabajo y el juego. Al mismo tiempo, la inteligencia será una de las propiedades de las máquinas de uso diario.

INDICE

Comentarios

LOS MICROCIRCUITOS adquieren compactación y densidad crecientes. Los componentes de este microcircuito de Motorola se han ampliado 3900 veces.

Microprocesadores del año 2020

En un cuarto de siglo, la potencia de cualquier ordenador igualará a la de todos los existentes hoy en el Valle del Silicio

David A. Patterson

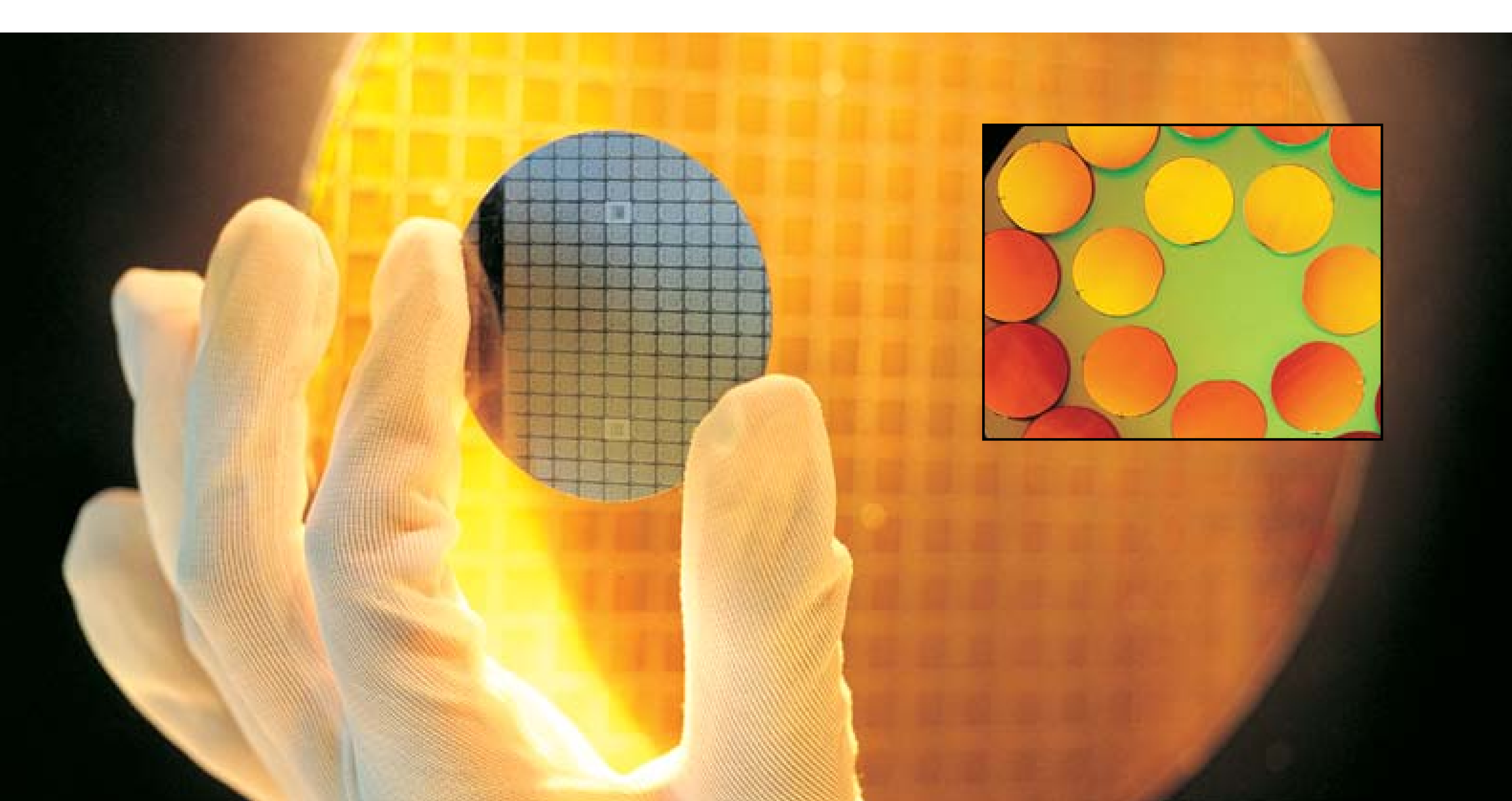
En cuanto leí el índice de este número especial me llamó la atención el número de artículos que de una forma u otra se ocupaban de la informática en el siglo XXI. A diferencia de otras muchas técnicas que se esfumaron al poco de haber ilusionado nuestra imaginación, la informática ha transformado nuestra sociedad. La locomotora de esta revolución en marcha es el microprocesador. Estas laminillas de silicio han originado un sinfín de inventos, como los ordenadores portátiles y los aparatos de telefax, y han aportado inteligencia a los automóviles modernos y a los relojes de pulsera. Increíblemente, su rendimiento ha mejorado 25.000 veces desde su invención, hace sólo un cuarto de siglo.

Dos fueron los inventos que encendieron la revolución informática. Consistió el primero en la noción de programa almacenado. Todos los sistemas de computación construidos desde los años cuarenta se han adherido a este modelo, que prescribe un procesador para triturar números y una memoria para el almacenaje de datos y de programas. La ventaja de tal sistema estriba en que, por la facilidad con que pueden intercambiarse los programas almacenados, un mismo equipo material realiza tareas diversas. Sin esa versatilidad, los ordenadores no se hubieran generalizado. Además, en los últimos años de ese decenio se inventó el transistor. Estos conmutadores de silicio eran muchísimo menores que las válvulas termoiónicas utilizadas en los primeros circuitos, y merced a ello permitieron la creación de dispositivos electrónicos mucho más rápidos.

Hubo de transcurrir más de un decenio antes de que los transistores y los programas almacenados se aunaran en la misma máquina. Y hubo que esperar a 1971 para que se produjera la conjunción más importante, en el microprocesador Intel 4004. Este procesador fue el primero de los construidos en una sola laminilla de silicio. Por su diminuto tamaño, se dio en llamarlo microprocesador.

El método que desde entonces han seguido los fabricantes para la producción en masa de microprocesadores se parece mucho al de hornear una pizza: la masa —de silicio— empieza siendo fina y redonda. Se depositan sobre ella ciertos aderezos químicos y se lleva el montaje a un horno. El calor transforma los aderezos en transistores, conductores y aislantes. No es de sorprender que el proceso, repetido quizá veinte veces, sea más exigente que la cochura de una pizza. Una partícula de polvo puede deteriorar los minúsculos transistores. Incluso las vibraciones de un camión al pasar pueden desalinear los ingredientes, echando a perder el producto final. Pero suponiendo que nada de esto ocurra, la oblea resultante se divide en piezas individuales, las laminillas (o "chips").

Aunque todavía se sigue utilizando esta vieja receta, con el transcurso del tiempo la línea de producción ha ido



DAVID A. PATTERSON es titular de la cátedra E. H. y M. E. Pardee de la Universidad de California.

fabricando microcircuitos cada vez más veloces y más baratos, eruptando obleas cada vez mayores y transistores cada vez más pequeños. Esta tendencia pone de relieve un importante principio de la economía de los microprocesadores: cuantos más microcircuitos por oblea, menor su costo. Los microcircuitos grandes son más veloces que los pequeños porque pueden albergar mayor número de transistores. El reciente procesador P6 de Intel, sea por caso, contiene cinco millones y medio de transistores, y es mucho mayor que el Intel 4004, que alojaba 2300. Pero cuanto mayor es el microcircuito, lo es también la probabilidad de acarrear defectos.

Desde hace muy poco, los microprocesadores han adquirido mayor potencia merced a un cambio de enfoque en su diseño. Los ingenieros de microcircuitos adoptan ahora un método cuantitativo para diseñar la arquitectura de los ordenadores. El desarrollo de los equipos va precedido de cuidadosos experimentos y los ingenieros se valen de métricas sensibles para juzgar sus éxitos. A lo largo de los ochenta, las compañías actuaron concertadamente para adoptar esta estrategia de diseño; gracias a ello, la tasa de perfeccionamiento en técnica de microprocesadores se ha elevado desde el 35 % anual de hace sólo un decenio a cosa de un 55 % al año, o sea, casi un 4 % cada mes. Los procesadores triplican ahora la celeridad pronosticada a comienzos de los ochenta; es como si nuestro deseo nos hubiera sido concedido y dispusiéramos de máquinas venidas del año 2000.

Además de los progresos conseguidos en la línea de producción y en la técnica del silicio, los microprocesadores se han beneficiado de recientes adelantos en el tablero de diseño. En un futuro cercano, estos avances desembocarán en nuevos progresos. Una de las técnicas clave es el procesamiento concurrente por etapas (conocido en la jerga por *pipelining*, o “canalización”). Quienquiera que haya tenido que hacer la colada ha utilizado de forma intuitiva esta táctica. En el procesado no concurrente se procede como sigue: se llena la lavadora con una carga de ropa sucia; terminado el lavado, la colada húmeda se lleva a la secadora y cuando la secadora acaba, se plancha la ropa. Terminada esta tarea, se empieza otra vez. De esta forma, si para dejar lista una carga se necesita una hora, para veinte cargas harán falta veinte horas.

1. LAS OBLEAS DE SILICIO actuales (*fondo de la imagen*) son mucho mayores que las que albergaron el primer microprocesador, el Intel 4004 (*en primer plano*). Una de las razones que permiten hacerlas mayores es que el proceso de manufactura es más limpio (*recuadro*).

El proceso de canalización es mucho más rápido. En cuanto la primera carga se encuentra en la secadora, se introduce en la lavadora una segunda, y así en lo sucesivo. Todas las fases del proceso se desarrollan concurrentemente. Lo paradójico es que se tarda lo mismo en lavar un solo calcetín sucio por uno y otro método. Sin embargo, la canalización es más rápida, en el sentido de que son más las cargas terminadas cada hora. De hecho, suponiendo que cada fase requiera el mismo tiempo, el tiempo ahorrado por este método es proporcional al número de etapas en que se descomponga la tarea. En el ejemplo de la colada, el lavado concurrente consta de cuatro fases, por lo que sería casi cuatro veces más rápido que la colada doméstica.

El proceso concurrente se encarga de que los microprocesadores sean mucho más veloces. Por así decirlo, los proyectistas de microcircuitos “bombean” por conductos distintos las instrucciones de bajo nivel enviadas al equipo físico. Los primeros microprocesadores de esta técnica utilizaban una división en cinco etapas. (El número de etapas ejecutadas por segundo está dado por la “velocidad de reloj”. Un ordenador personal provisto de un reloj de 100 megahertz ejecuta, pues, 100 millones de etapas por segundo.) Dado que la aceleración por canalización es igual al número de etapas, los microprocesadores han adoptado sistemas de ocho o más etapas. Un microprocesador fabricado en 1995 se vale de este recurso para alcanzar una velocidad de reloj de 300 megahertz. Conforme avanzan las máquinas hacia el siglo venidero, son de esperar mayores números de etapas y velocidades de reloj más elevadas.

También buscando fabricar microcircuitos más rápidos, los ingenieros han empezado a incluir más circuitería, para ejecutar más tareas en cada fase



2. LAS SALAS BLANCAS, en las que se construyen las obleas, están diseñadas para reducir al mínimo la manipulación por humanos y preservar de las partículas que flotan en el aire.

del procesamiento por etapas. Este método ha recibido el apodo de procesamiento “superescalar”. Una lavadora superescalar, por ejemplo, utilizaría un equipo profesional, capaz, digamos, de lavar triple carga de una vez. Los microprocesadores superescalares modernos tratan de realizar de tres a seis instrucciones en cada etapa. Por tanto, un microprocesador superescalar de cuatro vías, con reloj de 250 megahertz, puede ejecutar 1000 millones de instrucciones por segundo. Un microprocesador del siglo XXI podría lanzar docenas de instrucciones en cada etapa.

Aunque factibles, las mejoras en circuitos de proceso resultarán inútiles si no van a la par con ganancias similares en los elementos de memoria. Desde que a mediados de los años setenta quedaron disponibles las pastillas de memoria de acceso aleatorio (RAM), la capacidad de éstas ha venido cuadriplicándose cada tres años. Pero la velocidad de las memorias no ha podido mantener este ritmo. Y el vacío entre la velocidad máxima de los procesadores y la velocidad máxima de las memorias se está ensanchando.

Un recurso habitual consiste en instalar una antememoria (*cache memory*) en el propio procesador. La antememoria alberga aquellos segmentos de programa que se emplean con mayor frecuencia, lo cual evita en muchas

Los límites de la litografía

Aunque los microprocesadores continuarán mejorando con rapidez, no es seguro que tal progreso mantenga un paso constante. No está claro cómo construir transistores más pequeños y más rápidos. Los métodos fotolitográficos en uso están encontrando limitaciones serias. Si no se consigue resolver este problema, el progreso disfrutado desde hace decenios se detendrá chirriando.

En fotolitografía se utiliza luz para transferir las configuraciones circuitales desde una plantilla de cuarzo, llamada máscara, a la superficie de una laminilla de silicio. La técnica actual permite trazar en esta lámina elementos cuya anchura no baje de unas 0,35 micras. Si esta anchura pudiera acortarse a la mitad, los transistores podrían ser cuatro veces más pequeños, pues se trata de dispositivos esencialmente bidimensionales. Pero parece imposible construir elementos tan diminutos mediante la luz: las ondas luminosas son demasiado anchas. Muchas compañías han investigado la posibilidad de emplear rayos X, hasta la fecha sin éxito.



***REDUCCION DE LAS MASCARAS** y su proyección sobre obleas para fabricar circuitos.*

No faltan propuestas de otros tipos; por ejemplo, utilizar los haces de electrones con los que se crean las máscaras de cuarzo empleadas para configurar las obleas de silicio. El fino chorro de partículas cargadas podría ir trazando directamente sobre la laminilla, una por una, las líneas de un diagrama circuital. Aunque se trata de una solución factible, resulta lentísima y, en consecuencia, muy costosa.

Además de los obstáculos de índole técnica, el perfeccionamiento de los microprocesadores está amenazado también por el costo de las plantas de manufactura. Estos complejos cuestan hoy mil veces más que hace 30 años. Tanto los compradores como los vendedores de equipos para semiconductores se atienen a la regla de que la reducción a la mitad del tamaño del elemento mínimo provoca la duplicación del precio. Como es obvio, aunque se descubran métodos innovadores, los ingresos generados por la venta de láminas menores habrán de duplicarse para asegurar la continuada inversión en nuevas líneas. Esta regla solamente podrá cumplirse creando más laminillas o encareciéndolas. (D.A.P.)

ocasiones que el procesador haya de recurrir a la memoria externa. Algunos microprocesadores dedican ya tantos transistores a antememoria como al procesador. Los microprocesadores del futuro asignarán todavía más recursos a antememoria, para mejor salvar la diferencia de velocidades.

El santo grial de la informática se esconde en el "procesamiento en paralelo", que proporciona todos los beneficios de un solo procesador rápido haciendo funcionar simultáneamente muchos procesadores de bajo costo. En nuestro símil, podríamos ir a una lavandería y utilizar a la vez 20 lavadoras y 20 secadoras para hacer simultáneamente 20 cargas de colada. Como es obvio, el procesamiento en paralelo constituye una solución poco económica para cargas pequeñas. Y la construcción de un programa capaz de utilizar 20 procesadores a la vez es mucho más difícil que la distribución de colada entre 20 lavadoras. De hecho, tales programas tienen que especificar qué instrucciones pueden lanzarse en cada momento por cada uno de los procesadores.

El procesamiento superescalar guarda semejanzas con el procesamiento en paralelo y es más popular, porque el propio equipo determina automáticamente instrucciones lanzables al mismo tiempo. Pero carece de su potencial de procesamiento. Si la confección de los programas necesarios no resultara tan difícil, los procesadores en paralelo podrían adquirir la potencia que uno pudiera permitirse. La realidad cruda es que el procesamiento en paralelo sólo resulta práctico para unos pocos tipos de programas.

Repasando viejos artículos me he topado con fantásticas predicciones sobre los ordenadores de 1995. No pocos afirmaban que la electrónica cedería el paso a los dispositivos ópticos; otros, que los ordenadores serían de materiales biológicos; que se abandonaría la noción de programa almacenado. Tales visiones demuestran cuán imposible resulta prever qué inventos cuajarán y revolucionarán la industria informática. En mi carrera profesional he visto el asentamiento de sólo tres nuevas técnicas: los microprocesadores, las memorias de acceso aleatorio y las fibras ópticas. Decenios después de su puesta de largo, su impacto no se ha debilitado.

Sin duda alguna, a lo largo de los próximos 25 años se producirán unos pocos inventos que obligarán a revisar la informática. Mi conjetura es, sin embargo, que la noción de programa almacenado es demasiado elegante para que se prescinda de ella fácilmente. Estoy convencido de que los ordenadores futuros serán muy similares a las máquinas del pasado, aun cuando se construyan con materiales muy distintos. No creo que el microprocesador del año 2020 deje boquiabiertas a las personas de nuestro tiempo, aunque los microcircuitos más rápidos puedan ser mucho mayores que la primera oblea de silicio y pese a que los más económicos puedan ser mucho más diminutos que el Intel 4004 original.

Las técnicas de canalización, de antememoria y la organización superescalar continuarán desempeñando papeles principales en el progreso de la técnica de microprocesadores, y si las esperanzas se materializan, a ellas se sumará el procesamiento en paralelo. Lo que va a resultar pasmoso es que habrá microprocesadores en todo, desde los interruptores de la luz hasta pedazos de papel.

En la actualidad, los microprocesadores y las memorias se fabrican en líneas de manufactura distintas, pero no es obligado que sea así. Quizás en un futuro cercano los procesadores y las memorias queden asociados en una misma micropastilla, igual que el microprocesador casó los componentes

¿Y después del año 2020?

Los diseños microelectrónicos actuales, que tienen en sus entrañas una formidable capacidad innovadora, dominarán buena parte del siglo XXI. Esta tendencia no disuade a muchos laboratorios para explorar técnicas novedosas, aplicables tal vez en el diseño de nuevas generaciones de ordenadores y de dispositivos microelectrónicos. En ciertos casos, dichas técnicas permitirían que los diseños de microcircuitos alcanzasen una miniaturización imposible de obtener por técnicas similares a las litográficas al uso. Entre las líneas de investigación acometidas destacan:

Puntos cuánticos. Los puntos cuánticos son disposiciones moleculares que permiten atrapar electrones individuales y registrar sus movimientos. En teoría, estos dispositivos pueden servir de registros binarios en los que la presencia o ausencia de un electrón sirve para representar el 0 o el 1 de un bit de datos. En una variante de este esquema, al incidir luz láser sobre átomos podría hacerlos saltar de su estado electrónico fundamental a un estado excitado, cambiando así el valor del bit. Pero al hacer tan extremadamente pequeños los transistores y los conductores, ocurre que los efectos cuánticos comienzan a perturbar su función. Los componentes lógicos mantienen con menor fiabilidad sus valores 0 o 1, porque resulta difícil especificar las ubicaciones de electrones individuales. Sin embargo, podría sacarse partido de esta propiedad: Seth Lloyd y otros están estudiando las posibilidad de desarrollar técnicas cuánticas de computación que capitalicen el comportamiento no-clásico de los dispositivos.

Computación molecular. En lugar de construir componentes de silicio, algunos investigadores están tratando de desarrollar sistemas de almacenamiento de datos con moléculas biológicas. Robert L. Birge está examinando el potencial computacional de moléculas relacionadas con la bacteriorrodopsina, un pigmento que altera su configuración en respuesta a la luz. Una ventaja de tal molécula es que podría emplearse en un computador óptico, en el cual chorros de fotones desempeñarían el papel de los electrones. Otra consiste en que muchas de estas moléculas podrían sintetizarse por microorganismos. Según ciertas estimaciones, las biomoléculas fotónicamente activadas podrían quedar concatenadas en un sistema de memoria tridimensional cuya capacidad llegaría a ser 300 veces mayor que los CD-ROM actuales.



UN PUNTO CUANTICO* (violeta) *atrapa electrones en este semiconductor.

Puertas lógicas nanomecánicas. En estos sistemas, para realizar operaciones lógicas se procedería a desplazar físicamente diminutos haces o filamentos de un átomo de espesor.

Puertas lógicas reversibles. Conforme aumenta la densidad de componentes de los microcircuitos, más difícil se torna la disipación del calor generado en los cómputos. Se está valorando la posibilidad de reponer las capacitancias a su estado original cuando acaba un cálculo. Dado que las puertas lógicas reversibles recapturarían parte de la energía consumida, en ellas se disiparía menos calor.

La Redacción

de un procesador en una sola pieza. Para reducir el vano entre los rendimientos de los procesadores y las memorias, para aprovecharse del procesamiento en paralelo, para amortizar los costos de manufactura y, sencillamente, para sacar partido pleno del fenomenal número de transistores que caben en una laminilla, pronostico que, en el año 2020, el microprocesador de gama alta constituirá un ordenador completo.

Podríamos llamarlo IRAM ("memoria inteligente de acceso aleatorio"), pues la mayoría de los transistores de este microcircuito estarán dedicados a memoria. Mientras que los microprocesadores actuales han de recurrir a centenares de líneas de conexión con las memorias externas, los IRAM necesitarán sólo las conexiones a una red informática y a una toma de corriente. Los dispositivos de entrada/salida estarán enlazados a ellos a través de redes. Si necesitan más memoria, obtendrán al mismo tiempo mayor capacidad de procesamiento, y viceversa; esta organización mantendrá equilibrada la capacidad de memoria y la velocidad del procesador. Los IRAM constituirían también bloques de construcción ideales para el procesamiento en paralelo. Y dado que serán tan pocas las conexiones externas que requieran, estos procesadores podrían ser pequeñísimos. Es muy posible que veamos "picoprocesadores" baratos y menores que el antiguo 4004 de Intel. Si el procesamiento en paralelo tiene éxito, este mar de transistores podría también ser utilizado por múltiples procesadores instalados en una sola laminilla, proporcionándonos un micromultiprocesador.

Los microprocesadores actuales son casi cien mil veces más veloces que sus troglodíticos antepasados de los años cincuenta, y cuestan mil veces menos; estos extraordinarios hechos explican que la informática desempeñe ahora un papel central en nuestro mundo. Mirando hacia el futuro, es fácil que el rendimiento de los microprocesadores siga duplicándose cada 18 meses también en el próximo siglo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MICROPROCESSORS: FROM DESKTOPS TO SUPERCOMPUTERS. F. Baskett y J. L. Hennesy. *Science*, vol. 261, págs. 864-871; 1993.

COMPUTER ORGANIZATION AND DESIGN: THE HARDWARE/SOFTWARE INTERFACE. J. L. Hennesy y D. A. Patterson. Morgan Kaufmann Publishers, 1995.

COMPUTING PERSPECTIVES. M. V. Wilkes. Morgan Kaufmann Publishers, 1995. Siga la referencia en la World Wide Web http://cra.org:80/research.impact/ y mire bajo el epígrafe "RISC" para saber más acerca de la rápida elevación del rendimiento de los procesadores.

Redes inalámbricas

De aquí a diez años, prestarán servicios básicos en muchas zonas carentes de telefonía

George I. Zysman

GEORGE I. ZYSMAN es uno de los directores de los Laboratorios AT&T Bell.

En las postrimerías del siglo XIX, Guglielmo Marconi conectó un emisor de chispas a una antena y envió a través del aire una salva de ondas de radio hasta un sencillo receptor. El receptor hizo sonar un timbre. Nacía una técnica que prometía la comunicación a distancia entre personas en movimiento. En los decenios finales del siglo XX varias oleadas de innovaciones han hecho de las comunicaciones inalámbricas el sector de más rápido crecimiento de la industria de comunicaciones.

Las redes inalámbricas están proliferando con rapidez. Se están haciendo digitales, poniendo a su servicio técnica de "red inteligente" para localizar e identificar a sus usuarios en movimiento y ajustar a su medida los servicios que reciben. Una red inteligente consiste en una red distribuida de señalización, que integra centrales, bases de datos y ordenadores "servidores" especializados; aunque íntimamente conectada a las redes de transporte por las que fluyen las voces y los datos de los abonados, constituye una estructura distinta. Esta, que se ha venido perfeccionando a lo largo de los últimos treinta años para mantener servicios como los de prefijo 900, la identificación del llamante y el "091", logrará pronto que los servicios de comunicaciones a la medida sean tan portátiles como un teléfono de bolsillo.

La convergencia en el mercado de los avances en microelectrónica, radio digital, procesamiento de señales y programación de redes está logrando que los teléfonos portátiles sean de menor tamaño, más inteligentes y más económicos. Algunos adoptan formas nuevas, como en el caso de los ordenadores inalámbricos "de mano" conocidos por auxiliares personales digitales (APD), capaces de manejar textos y gráficos, además de mensajes de audio; el vídeo no tardará demasiado. Con frecuencia mayor cada vez, los sistemas de programas que actúan en los terminales "inteligentes" (cuyos ejemplos típicos son las interfases gráficas y los agentes informáticos hoy disponibles en los APD) funcionarán codo a codo con redes inteligentes al objeto de ampliar las comunicaciones portátiles.

Los servicios celulares constituyen hoy la punta de lanza que más cala en el mercado de comunicaciones inalámbricas, pues el número de usuarios de estos servicios crece anualmente a razón del 50 por ciento en Norteamérica, del 60 por ciento en Europa occiden-



1. LAS REDES INALAMBRICAS de técnica celular constituirán la primera infraestructura que proporcione servicio telefónico a ciertos lugares, como en esta hacienda argentina.

tal, del 70 por ciento en Australia y en Asia, y de más del 200 por ciento en los mayores mercados de América del Sur.

Los analistas prevén que en el año 2001 casi 500 millones de personas estarán abonados a algún tipo de servicio inalámbrico. La FCC (Comisión Federal de Comunicaciones) ingresó en 1994 más de 8000 millones de dólares —y más que han de venir— procedentes de la subasta de licencias de utilización de técnicas recién nacidas, así como del espectro radioeléctrico en torno a la frecuencia de 2 gigahertz, cuya finalidad es proporcionar un nuevo conjunto de servicios inalámbricos, conocidos por servicios de comunicaciones personales (SCP). Antes de que concluya el siglo, todos los proveedores de servicios en Europa, Japón, Tailandia, Singapur, Malasia, China, Australia, Nueva Zelanda y la India proyectan tener instalados y en servicio sistemas SCP.

El crecimiento del mercado inalámbrico ha aumentado la presión sobre los organismos reguladores para que asignen mayores porciones del espectro y, sobre los suministradores de servicios, para que las utilicen mejor adoptando técnica digital.

La mayoría de los sistemas celulares actuales son de tipo analógico: la voz e incluso los datos digitales se codifican mediante modulaciones continuas de una onda portadora, que más tarde se decodifican en el receptor. Son ya muchos los proveedores de servicios celulares que están convirtiendo sus redes a alguno de los diversos estándares digitales que traducen la voz y los datos en un flujo de bits, una riada digital que se transmite a su vez mediante formas de onda que representan impulsos individuales. Los sistemas digitales pueden simultáneamente ampliar la capacidad del medio y comprimir los mensajes que transportan.

Las redes celulares y de SCP utilizarán dentro de poco alguno de los estándares de interfaz aérea digital —los distintos sistemas de compartición simultánea de un espectro limitado entre muchos usuarios— que compiten hoy por su aceptación. Queda por ver si alguno de ellos acabará vencedor absoluto. Lo más probable es que las estaciones base inteligentes y los terminales anfimodales se adapten a un centón de estándares de interfaz aérea multiacceso, repartidos por todo el horizonte inalámbrico. Pero los principales estándares de interfaz aérea digital ofrecen todos una ventaja similar: su capacidad para comprimir mayor número de bits de conversaciones en un estrecho segmento del espectro que un servicio analógico.

En cuanto los proveedores se pasen al sistema digital podrán aumentar todavía más el número de clientes atendidos valiéndose de técnicas de compresión, en constante refinamiento. Un flujo de ocho kilobits por segundo transmite voz con buena calidad; una calidad superior, que hasta hace poco había que suministrar a 32 kilobits por segundo, requiere ahora sólo 13 kilobits.

Los proveedores podrán anticiparse a la demanda contrayendo el tamaño de cada célula —el área cubierta por una sola estación base— en las zonas muy pobladas. Con normas digitales, la adición de células nuevas resulta mucho más sencilla, ya que proporcionan corrección de errores y ayudan a los receptores en la resolución de interferencias entre células adyacentes.



2. TELEFONO INALAMBRICO de pulsera creado en los Laboratorios AT&T.

El paso a la técnica digital está llevando las terminales de comunicaciones hacia mayor funcionalidad, menor tamaño y potencias más bajas. Los teléfonos portátiles y otros dispositivos inalámbricos son, en esencia, computadoras diminutas dotadas de equipos electrónicos adicionales para la transmisión y recepción de señales de radio. Y en tal carácter, están sujetas a la ley de Moore, axioma postulado en 1965 por Gordon Moore, cofundador de Intel. Esta ley señala que el rendimiento de los microcircuitos producidos en masa se duplica más o menos cada 18 meses.

Cada año y medio, los microcircuitos digitales necesarios para operar un terminal inalámbrico o una estación base se contraen en torno a un 50 por ciento. Los teléfonos celulares ya caben en el bolsillo. No tardarán en llevarse de pulsera. Las estaciones base analógicas, que actualmente exigen torres, terrenos y casetas con aire acondicionado, acabarán reemplazadas por estaciones base digitales completamente anodinas, encargadas de minicélulas.

A lo largo de los próximos años, los operadores de televisión por cable comenzarán a añadir estaciones base a sus redes de fibra óptica y de cable coaxial, transportando tráfico telefónico por canales de cable no utilizados y facilitando acceso inalámbrico a los vecindarios. Si utilizasen el mismo estándar de acceso aéreo que un portador celular local, sus abonados telefónicos podrían hacer llamadas por medio de la red celular y viceversa. Las compañías de energía, que además de redes de distribución energética poseen ubicuas parrillas de comunicaciones, están haciéndose ya consideraciones similares.

Aunque no hay duda de que los teléfonos portátiles y los buscapersonas resultan muy convenientes, a largo plazo todavía causarán mayor impacto sobre nuestra forma de comunicarnos dispositivos nuevos y sistemas de redes capaces de transmitir y recibir texto e imágenes por vía aérea. En la actualidad, radiomódems integrados en ordenadores portátiles, auxiliares personales y otros dispositivos digitales de mano son ya capaces de interconectarlos a través de las redes celulares existentes, predominantemente analógicas; existen además varias redes especializadas para la transmisión inalámbrica de datos. Las redes celulares digitales para servicios móviles y de paquetes de datos ofrecen otras opciones. La FCC, en subastas desarrolladas en 1994, concedió licencias para suministrar “SCP de banda estrecha”, a saber, transmisión bidireccional de mensajería de datos a velocidad moderada y servicios de mensajería personal en ambas direcciones, en frecuencias próximas a los 900 megahertz.

La primera generación de ordenadores inalámbricos no tuvo demasiado

éxito, tal vez porque resultaban incómodos y su funcionalidad era demasiado limitada para su costo. Pero conforme las personas de todas las edades e ingresos se vayan familiarizando con el correo electrónico, los servicios en línea e Internet, resulta razonable pensar que desearán acceder en cualquier momento a la información ofrecida por estos medios.

Resulta posible adaptar dispositivos anticuados para recibir los mensajes recién salidos del horno. Varias compañías ofrecen filtrar y distribuir correo electrónico vía satélite, a razón de una línea por vez, hasta nuestro buscapersonas alfanumérico. Los microcircuitos de síntesis de voz son lo suficientemente perfectos y económicos para poder ser incorporados a los teléfonos, por lo que podrían leer texto en voz alta. Pero otros dispositivos más versátiles exigirán pantallas de presentación y velocidades de transmisión rápidas para manipular gráficos y texto.

La técnica de red analógica limita las comunicaciones por módem a velocidades relativamente reducidas: 14,4 kilobits por segundo, o menos. Las redes digitales facilitarán un poco las cosas, al eliminar la conversión entre los formatos digital y analógico; para el servicio normal no será necesario aumentar las velocidades de datos más allá del equivalente de una línea telefónica.

Al final, incluso el refuerzo producido por las normas digitales actuales y las técnicas de compresión resultará insuficiente para proporcionar espacio para trasladar mensajes densamente cargados de datos entre cientos de millones de clientes. A finales de siglo serán cosa corriente los equipos inalámbricos de telefax y el correo de vídeo podría emplearse a través de redes inalámbricas o de tendidos alámbricos. Si se quiere dar acomodo al consecuente diluvio de imágenes, es probable que se haga en frecuencias cercanas a los 30 o 40 gigahertz, aunque ciertos servicios de vídeo pudieran estar disponibles a 2,5 gigahertz. Dado que a tan cortas longitudes de onda las señales de radio se comportan como la luz, los edificios e incluso el follaje las bloquean, y la cobertura está limitada a la zona de visión directa. Por tanto, los servicios inalámbricos de banda ancha habrán de ser fijos y no móviles, y los proveedores de servicios habrán de contraer todavía más las células para atender a legiones de abonados.

Es probable que también evolucionen las normas de interfaz aérea, para dar acomodo a la transmisión de datos y de vídeo de banda ancha. La primera generación de estándares digitales supone una conexión de tipo circuital entre dos dispositivos durante la totalidad de una llamada. Tal disposición se adapta más a las llamadas telefónicas que al surfeo por la red. La Internet recurre a estándares basados en el encarrilado (*routing*) de paquetes de datos que llevan cada uno la dirección de destino.

Las compañías telefónicas que diseñan redes de fibra óptica para portar servicios de vídeo interactivo proyectan conectarlas con centrales de conmutación de paquetes de banda ancha,

Telefonía inalámbrica para países en desarrollo

La misma técnica que proporciona servicio a personas en movimiento puede facilitar tono de llamada en regiones donde jamás podía oírse anteriormente. Lo que significa una gran parte del planeta: alrededor de la mitad de sus moradores no han realizado jamás una llamada telefónica.

Dos son las ventajas que los países en desarrollo aprecian en los sistemas de telefonía inalámbrica. La primera es el coste. Gran parte de las instalaciones necesarias para una red alámbrica tradicional se proyectan para 20 o 30 años de expansión del servicio. En consecuencia, el costo de construcción de tal red donde no existe infraestructura puede resultar prohibitivo.

Con una red "inalámbrica fija", concebida más para dar acceso que para atender a la movilidad, el proveedor de servicios puede cubrir una amplia región con estaciones base y una sola central de conmutación y control, efectuando una inversión bastante menor. Los abonados pueden entonces conectarse a la red global utilizando teléfonos portátiles, teléfonos públicos inalámbricos o terminales montados en edificios y conectados por cable a teléfonos normales. Al crecer el número de abonados, el proveedor de servicios puede añadir fácilmente más estaciones base para dividir la región cubierta por la red en sectores menores.

La segunda ventaja es el tiempo. Las redes inalámbricas pueden instalarse en meses. Argentina, por ejemplo, anunció en febrero de 1994 la concesión de licencias para todo el país a CTI, un consorcio controlado por GTE. En mayo, una red inalámbrica de 800 células fijas que AT&T construyó para CTI estaba ya en servicio. La red puede servir hasta 160.000 abonados.

Las telecomunicaciones constituyen la principal infraestructura para la economía global. Donde tenga la posibilidad de ser rentable, la técnica inalámbrica podría ofrecer un asidero para la participación en ese mercado a muchas regiones del mundo que, de lo contrario, podrían verse excluidas.



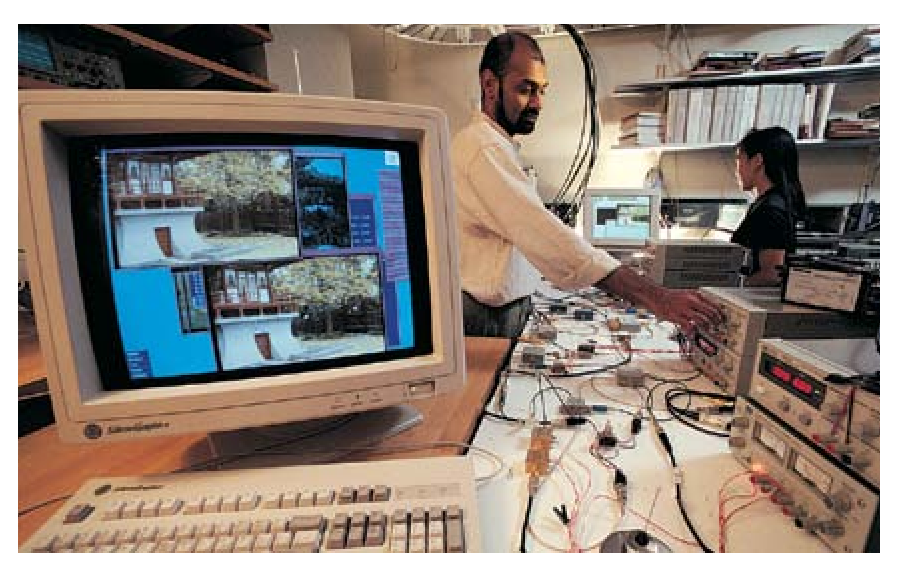
***REGIONES DE LA ARGENTINA** inaccesibles para la telefonía alámbrica están ahora servidas por una red inalámbrica.*

utilizando el "modo de transmisión asíncrona", técnica que es capaz de encarrilar paquetes de datos, voz y vídeo a velocidades extremadamente altas por las sendas apropiadas. Es posible que sean los proveedores de servicios inalámbricos y las compañías de televisión por cable quienes tomen la delantera hacia la transmisión asíncrona. La temporización dependerá de los recursos existentes en la red, de los planes técnicos y de las estrategias de inversión.

Al aumentar la popularidad de los teléfonos portátiles, tenderán a ofrecer mayor número de prestaciones. Dentro de diez años seguirá siendo posible adquirir un dispositivo inalámbrico barato, sencillo y limitado a llamadas de voz. Sin embargo, serán más corrientes los dispositivos capaces de habérselas con faxes y con vídeo y de ejecutar programas informáticos. Los habrá sin duda de muchos tipos y con capacidades muy dispares, lo que podría ser causa de tropiezos. Cuanto más inteligente sea un dispositivo, mayor es el peligro de que su complejidad desconcierte al usuario. Y modelos distintos funcionarán de distinta manera. Usar el teléfono de un amigo para hacer una llamada puede dejarnos desconcertados ante una interfaz que nos es completamente extraña.

Una forma de simplificar el funcionamiento de los artilugios inalámbricos de mano y de hacerlos más domeñables consiste en situar en la red parte de la inteligencia necesaria para llevar a cabo tareas útiles. Los servicios inteligentes ahora disponibles pueden, por ejemplo, pasar automáticamente las llamadas al automóvil, a la oficina, al domicilio, al teléfono móvil o al correo hablado del usuario. El acierto de los servicios móviles mejorará merced a sistemas de programas que faciliten la cooperación entre dispositivos y redes inteligentes, haciendo así posibles interacciones más complejas.

La visión que en AT&T tenemos del SCP es que ha de proporcionar el servicio adecuado en la ubicación y dispositivo correcto sin que intervengan ni el llamante ni el abonado. La clave consiste en seguirles la pista a los usuarios. Una solución sería utilizar números particulares: uno por persona, en lugar de los tres, cinco, siete o más que en la actualidad definen los distintos dispositivos y ubicaciones de la red en la que podría localizarse una persona. Regístrese en la red, y ésta traducirá su número particular, marcado por el llamante, en el número del buzón o dispositivo local adecuado, en función del tipo de llamada o mensaje y de las preferencias de su servicio.



3. VIDEO DIGITAL INALAMBRICO. Se están investigando técnicas innovadoras de procesamiento de señal para hacer mínimos los efectos de la compresión y de los azares que entraña la transmisión aérea sobre la calidad de la imagen.

Otra solución es la ofrecida por las tarjetas inteligentes. Si todos los teléfonos estuvieran equipados con un lector de tarjetas, podríamos insertar la tarjeta propia en el teléfono más cercano, aunque perteneciera a otra persona, y dejar constancia a la red de nuestra presencia, la cual nos pasaría todas las llamadas —o quizá sólo las procedentes de una lista de números prioritarios— hasta ese teléfono. Se podría también enviar a la red nuestro plan ordinario para el día y utilizar la tarjeta para indicar las excepciones.

Las tarjetas inteligentes podrían contribuir también a superar la dificultad de uso de teléfonos muy perfeccionados. Cuando viajamos a otro país, el 091 no corresponde normalmente a la policía, ni el prefijo para llamadas internacionales suele ser el 07. Estos códigos, específicos de cada país, pueden proliferar conforme se van haciendo más complejos los aparatos. Pero en una tarjeta inteligente podría quedar almacenada la descripción de una interfaz: al insertarla en un aparato desconocido, éste podría configurarse de modo que funcionase como el aparato propio. No sería necesario aprender a utilizar una plétora de nuevos dispositivos; serían éstos, en cambio, los que aprendieran a funcionar con nosotros.

La operatividad de las tarjetas inteligentes está ya comprobada. Los problemas de respeto a la intimidad personal y comercial que plantean son harina de otro costal. Hay gran variedad de empresas que ve aplicaciones en las tarjetas inteligentes, pero todas están interesadas en controlar la información particular almacenada en ellas.

Existen otros procedimientos, menos controvertidos, de seguir la pista a los llamantes y proporcionar servicios específicos para cada ubicación. Los sistemas celulares pueden ya localizar la posición de un llamante con precisión de kilómetros cuadrados. Una opción más ajustada consistiría en dotar a los equipos con receptores del Sistema Global de Localización, que determina la posición con errores de unos 30 metros valiéndose de señales de una constelación de satélites en órbita. Una variante más económica podría consistir en localizar los dispositivos por triangulación desde los emplazamientos de las células; este tercer método podría ser asimismo más preciso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WIRELESS TECHNOLOGY. Número especial de *AT&T Technical Journal*, vol. 72, n.º 4; julio-agosto de 1993.

WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS. Número especial de *IEEE Communications Magazine*, vol. 33, n.º 1; enero de 1995.

Redes ópticas

Las fibras ópticas se tornarán más eficientes a medida que las ondas luminosas sustituyan los electrones en el procesamiento de señales

Vincent W. S. Chan

Las redes de fibra óptica transmiten voz, vídeo y datos a velocidades de 10 a 100 veces superiores que en los tendidos habituales de hilo de cobre utilizados durante más de un siglo. A pesar de ello, sólo se ha materializado una pequeña fracción de lo que dicha técnica promete. Para dar pleno desarrollo a sus posibilidades, las fibras ópticas no pueden limitarse a reemplazar los tendidos telefónicos alámbricos por guías de luz en forma de finas hebras cilíndricas de vidrio. La transmisión óptica ha de vencer las limitaciones impuestas por la técnica electrónica que la precedió.

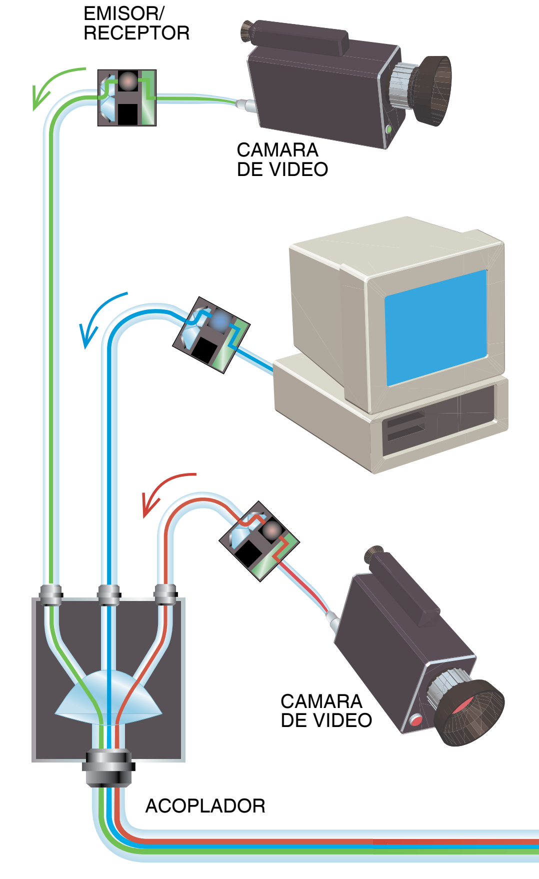
En las redes de fibra óptica de nuestros días, cada vez que un pulso luminoso ha de amplificarse, conmutarse, introducirse o eliminarse de la red, ha de empezar por convertirse, para ser procesado, en un flujo de electrones. Esta conversión optoelectrónica puede constituir un obstáculo en las comunicaciones a muy alta velocidad. Resulta preciso reforzar la red con elementos electrónicos más caros y complejos, y el procesamiento de los brevísimos pulsos luminosos necesarios para transmitir decenas de gigabits de información digital en un segundo se vuelve más difícil. (Un gigabit son mil millones de bits.) Alcanzada cierta velocidad de transmisión —en torno a los 50 gigabits por segundo— los equipos electrónicos tendrán dificultad para habérselas con la interminable transformación de electrones en ondas de luz y viceversa.

La transferencia de una señal óptica desde un extremo a otro de la red resultaría más sencilla, rápida y económica si se utilizasen las características de la propia onda luminosa para encaminar la transmisión por las distintas vías de la red. La señal sólo se convertiría en señal electrónica al ingresar en los circuitos del ordenador a los que está destinada o al llegar a una red más lenta que todavía emplease el procesamiento electrónico de las señales.

Esta red exclusivamente óptica se edificaría sobre los éxitos de las redes de fibra óptica ya instaladas, que recurren a componentes optoelectrónicos para el procesamiento de señales. Los cables comerciales de fibras ópticas transfieren las llamadas telefónicas y las imágenes de vídeo mediante bits digitales, a razón de hasta 2,5 gigabits por segundo y fibra. Basta semejante transporte de información "multigigabinario" para trasladar en un segundo toda una edición de la Enciclopedia Británica de una a otra ribera del Atlántico. Pero si el tráfico de comunicaciones creciera de forma importante, su dependencia de la optoelectrónica acabaría por limitar la capacidad de estas redes para portar más información.

Es muy posible que la revolución de las comunicaciones de alta velocidad por fibra no haya sino acabado de empezar. De surgir un mercado para el vídeo digital, hasta las redes comerciales más rápidas podrían verse desbordadas. El vídeo digital exigirá una capacidad de comunicación —"anchura de banda"— hasta 500 veces mayor que las llamadas telefónicas ordinarias transmitidas por fibra óptica.

Una red tal podría dar acomodo al flujo de volúmenes enormes de datos digitales. Abundan las propuestas de creación de bibliotecas "en línea" de tamaño suficiente para albergar la totalidad de los textos, imágenes y registros sonoros de la Biblioteca del



1. LAS REDES OPTICAS PURAS operan sin conversión de la señal óptica a formato electrónico. Cada ordenador o cámara de vídeo de un segmento de la red —una subred, como la de la izquierda— se vale de un emisor para enviar una sola longitud de onda, representada por una línea de color. Cada longitud de onda acarrea varios gigabits por segundo. Las tres señales se multiplexan o funden en una fibra óptica y se envían a través de un amplificador óptico que refuerza las señales. Cada longitud de onda pasa después a un encarrilador; desde allí se remite a otras subredes. En el caso de que dos señales compartan la misma longitud de onda en una misma fibra —como en la subred del ángulo superior derecho— un convertidor de longitud de onda desplaza una de las señales a una longitud de onda diferente, para evitar el conflicto; la señal procedente del encarrilador se conmuta, por ejemplo, del rojo al azul.

Congreso. Una red de comunicaciones capaz de transportar terabits (1 terabit = 10^{12} bits) de información por segundo podría abrir al completo para cada hogar, cada escuela, despacho o laboratorio los recursos de una biblioteca de investigación.

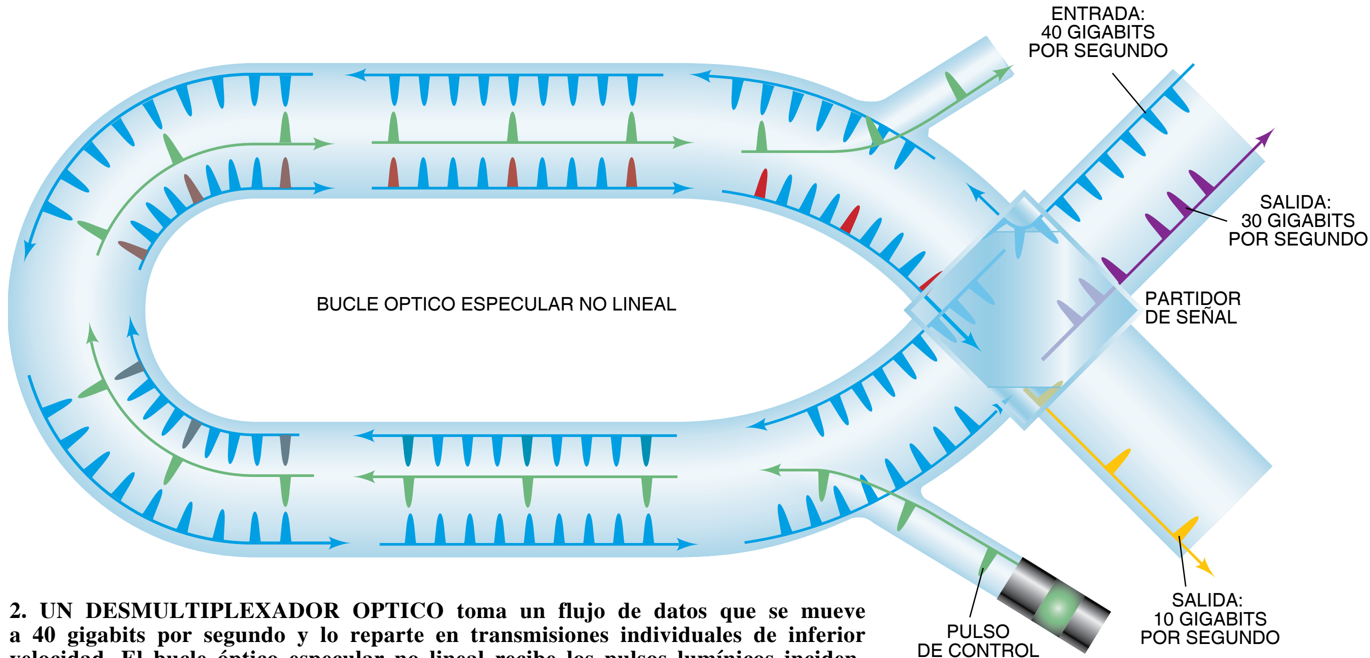
Para que estos supuestos cobren realidad, se han de idear métodos que permitan utilizar mejor la capacidad de una fibra óptica. Una sola fibra podría, en teoría, transportar 25 terabits cada segundo. Pero la cifra práctica de transporte de información de una fibra es mucho más reducida: está limitada por la tendencia a difuminarse de los pulsos denotativos de ceros y unos tras recorrer distancias grandes, así como por la inexistencia de componentes ópticos capaces de procesar información a estas cegadoras velocidades. Progresos recientes en la investigación parecen prometer que la anchura de banda no utilizada en la red podrá aprovecharse.

Muchos son los esfuerzos investigadores que tratan de sacar partido al descubrimiento en comunicaciones ópticas más importante del decenio pasado: el amplificador óptico. Dicho dispositivo permite restaurar la potencia de una señal a su intensidad inicial sin recurrir a la conversión optoelectrónica habitual. En un amplificador óptico se embeben iones de erbio en el vidrio de una fibra óptica. Al ser estimulados por un láser, los iones excitados revivifican las señales ópticas debilitadas por un viaje de varias decenas de kilómetros. Los amplificadores ópticos instalados en redes comerciales han exhibido un funcionamiento superior en el caso de enlaces de muy alta velocidad: a diferencia de los electrónicos, amplifican señales portadoras de datos a velocidades de transmisión superiores a los 50 gigabits por segundo, y pueden además reforzar simultáneamente la potencia de muchas longitudes de onda.

Con la técnica de multiplexación óptica se utiliza mejor la fibra, pues permite enviar por una misma fibra distintas señales portadoras de datos. La importancia de la multiplexación se debe a la capacidad que podría exigírsele a las redes futuras. Un programa de televisión con imágenes de alta resolución, pongamos por caso, podría consumir una anchura de banda de hasta 1 gigabit por segundo si no se comprimen los datos de la imagen. La variante más sencilla, o multiplexación por división de longitud de onda, se parece a los sistemas de radiodifusión. Cada emisor de esta red contiene un láser sintonizable, que despacha señales lumínicas de determinada longitud de onda (o color.)

Un receptor optoelectrónico puede sintonizarse a la longitud de onda deseada. En el laboratorio, AT&T ha demostrado que este método de combinación de señales permite hasta 17 longitudes de onda diferentes, cada una de las cuales transporta unos 20





2. UN DESMULTIPLEXADOR OPTICO toma un flujo de datos que se mueve a 40 gigabits por segundo y lo reparte en transmisiones individuales de inferior velocidad. El bucle óptico especular no lineal recibe los pulsos lumínicos incidentes (cada pulso representa un bit de datos) y los escinde en dos. Las señales proceden a través del bucle de fibra óptica en sentido opuesto. El tren de pulsos de control (*verde*) y los pulsos azules dextrógiros interactúan entre sí a causa de ciertas propiedades físicas de la fibra, que son de carácter no lineal. Esta interacción de pulsos lumínicos modifica la fase de algunos pulsos dextrógiros (*pulsos azules que se vuelven rojos*). Después de que el pulso de control abandona el bucle, los flujos de pulsos que avanzan en sentido contrario vuelven a fundirse en el partidor de señal, emitiendo pulsos de 10 gigabits por segundo (*amarillo*) desde una fibra y pulsos de 30 gigabits por segundo (*violeta*) desde la otra.

gigabits por segundo —lo que da un total de 340 gigabits por segundo— que es posible transportar hasta una distancia de casi 150 kilómetros.

Pese a las enormes posibilidades de la fibra óptica, la capacidad para transportar información de las redes basadas en el sistema de difusión por longitud de onda puede llegar a agotarse. Las longitudes de onda contiguas sólo pueden transportar un número limitado de transmisiones de vídeo sin que las señales de unas se interfieran con las de otras. Para evitar conflictos entre las señales, es preciso intercalar una "banda de protección" en una porción no utilizada del espectro óptico situado junto a cada una de las longitudes de onda portadoras de información. La presencia de la banda de protección reduce la amplitud de la banda útil.

Dado que la capacidad de la red puede quedar saturada, tendrá que segmentarse en diversas subredes. Las longitudes de onda portadoras de mensajes en una subred pueden volver a aprovecharse para las transmisiones propias de otra subred. Una vez más, los medios de radiodifusión ya existentes presentan una analogía: una estación de radio de Lérida y otra de Valladolid pueden utilizar la misma frecuencia sin provocarse interferencias.

La construcción de una red operativa a partir de estas nociones plantea cierto número de problemas técnicos. En marzo de 1995, un consorcio integrado por AT&T, Digital Equipment Corporation y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) exhibió un sistema de multiplexación por división de longitud de onda que enlazaba cierto número de subredes. Cada fibra de esta red tiene capacidad para 20 longitudes de onda, cada una de las cuales puede transportar hasta 10 gigabits por segundo de datos digitales.

Este programa de redes puramente ópticas, patrocinado por la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Defensa (ARPA), con inversiones adicionales de AT&T y de Digital Equipment Corporation, ha verificado el funcionamiento de los equipos críticos para la multiplexación por división de longitud de onda, a saber, los láseres y los dispositivos de filtrado necesarios para enviar y recibir longitudes de onda específicas por una misma fibra. Ha explorado asimismo sistemas puramente ópticos para la conmutación de esas señales a distintas fibras, en el paso de una subred a otra. Un dispositivo conmutador prismiforme, el "encarrilador", difracta la luz que viaja por una fibra en las longitudes de onda que la componen. Cada longitud de onda puede ser encaminada por una senda distinta en el interior de la estructura de silicio y cristal y "encarrilada" por una de las 20 fibras de salida que envían las señales hacia su destino. El consorcio ha ensayado también otro dispositivo óptico (un convertidor de longitud de onda) capaz de cambiar la longitud de onda de la luz. La eficacia de tal dispositivo se manifiesta cuando transmisiones distintas entran en conflicto al tratar de utilizar una misma longitud de onda.

Además de la red de Massachusetts, se han lanzado con financiación de ARPA otros proyectos orientados hacia la multiplexación por división de longitud de onda. El Programa RACE ("Investigación y Desarrollo para las Comunicaciones Avanzadas en Europa), dependiente de la Unión Europea, ha comenzado también a investigar esta técnica, y otro tanto ha hecho NTT, el gigante nipón de las comunicaciones. La multiplexación por división de longitud de onda se adapta de forma ideal a la creciente demanda de comunicaciones de vídeo, en las

cuales dos localidades pueden permanecer durante horas en conexión continua.

Mas para enviar datos de un ordenador a otro harán falta redes de un tipo diferente. Las redes de ordenadores, a diferencia de los enlaces de vídeo, acostumbran enviar datos de un punto a otro (como los de un fichero gráfico digital) en breves pulsos de alta velocidad. Para dar acomodo a este tipo de tráfico, los ordenadores suelen comunicarse a través de redes en las cuales los datos se trasladan de un remitente a un destinatario en unidades discretas, o paquetes. Un mensaje se descompone en varios, para encarrilarlos después hacia alguna de las diversas sendas abiertas que conduzcan hasta un ordenador destinatario.

El sistema de conmutación por paquetes facilita una transferencia de datos más rápida y económica, porque no hay necesidad de invertir dinero ni recursos en el establecimiento de una conexión dedicada exclusivamente a los comunicantes. Cada paquete contiene una dirección que expresa su destino y el modo en que encaja con otros paquetes que forman parte del mismo mensaje. Los paquetes pueden viajar hasta su destino por cualquier senda que ofrezca la red. En el punto de destino, los paquetes se tornan a ensamblar, componiendo con ellos un mensaje coherente.

La versión electrónica más conocida de red por paquetes es Internet. Podemos atisbar el futuro de ésta examinando las investigaciones avanzadas en redes ópticas por paquetes. En una red de este tipo, una misma longitud de onda portaría pulsos lumínicos de un láser capaz de cambiar de estado en una billonésima de segundo. Los pulsos lumínicos están generados por láseres que transmiten hasta 100 gigabits por segundo, en los que cada destello representa un bit. Cada pulso se combinaría con otros 10.000 procedentes del mismo láser, formando, juntos, un paquete de datos.

Uno de los principales problemas que plantea una tal autopista óptica es la multiplexación y conmutación de estos paquetes de datos sin tener que convertirlos en señales electrónicas. Una fibra puede transmitir un total de 100 gigabits por segundo, pero está dividida en intervalos temporales especificados, de forma que 10 usuarios —sea por caso— pueden enviar cada uno 10 gigabits por segundo.

A cada remitente de datos puede asignársele un segmento temporal en el cual colocar paquetes con 10 gigabits de datos por segundo en la red, o puede transmitirlos en cualquier segmento libre. Los paquetes de un remitente pueden quedar entremezclados con paquetes de otros remitentes, cada uno de los cuales dispone de un intervalo temporal distinto en el cual transmitir su mensaje. Dado que la capacidad de comunicaciones está repartida por medio de tiempos y no de longitudes de onda, esta técnica se denomina multiplexación por división de tiempo.

En el MIT hemos estado trabajando en diseños de una red óptica de 100 gigabits por segundo que utilizase esta técnica de multiplexación. Los elementos físicos de la red en fase de desarrollo van desde láseres de alta velocidad, capaces de transmitir 100.000 millones de pulsos por segundo, hasta amortiguadores ópticos para el almacenaje de pulsos.

En uno de los proyectos hemos mostrado una forma de extraer datos de una fibra que transporta un total de 40 gigabits de datos utilizando multiplexado por división de tiempo. Un dispositivo, denominado bucle óptico especular no lineal, procesa la señal óptica a multiplexar, desmultiplexar o conmutar. Para la desmultiplexación, recibe pulsos luminosos de una fibra que transporta un flujo de datos de 40 gigabits por segundo. En el bucle especular, que consiste en una hebra circular de fibra que posee propiedades materiales especiales, la señal óptica interactúa con otra serie de pulsos lumínicos inyectada por láser en el dispositivo. La interacción de estos diferentes trenes de pulsos de luz hace que emerja una señal, que introduce 10 gigabits de datos en una nueva fibra.

Al mismo tiempo, la señal original —que ahora porta los restantes 30 gigabits de datos por segundo— retorna a la fibra por donde llegó al espejo. Si no se desea efectuar la desmultiplexación, la luz retorna inalterada a la fibra, transportando todavía los 40 gigabits por segundo. El MIT no está solo. NTT acaba de acometer un experimento similar con una transmisión de 100 gigabits por segundo.

El bucle óptico especular puede actuar también como dispositivo de procesamiento digital. En la desmultiplexación de la señal, el bucle, o modifica la señal, o la deja invariable, lo que define dos estados binarios, como el 0 y el 1 de la lógica digital. Concatenando varios de estos bucles se confecciona un dispositivo óptico capaz de "leer" las direcciones de los paquetes de datos.

Los ingenieros de redes podrían combinar la lógica óptica y la desmultiplexación para construir una rudimentaria centralita de comunicaciones. Los dispositivos lógicos, leyendo la dirección de un paquete, determinarían si de la señal entrante hay que descargar datos; en tal caso, el desmultiplexador encarrilaría los datos deseados a una fibra de salida, para encaminarla hacia el ordenador o la subred apropiada.

El MIT ha recurrido también a la fibra óptica para construir un dispositivo óptico de almacenamiento, un amortiguador capaz de alojar transitoriamente pulsos de luz antes de encaminarse a su destino. En el prototipo, una señal que entre en el bucle se canaliza a través de una serie de dispositivos que restauran y acondicionan la señal. La capacidad de retener información en estos dispositivos está reforzada por un solitón, tipo de pulso luminoso que conserva su forma original casi indefinidamente. La capacidad del solitón para resistir la degradación lo hace idóneo para transmisiones a larga distancia por redes ópticas.

A decir verdad, apenas si podemos empezar a imaginar las aplicaciones de una red en la que la anchura de banda se vuelva tan económica como la electricidad, el gas o el agua.

VINCENT W. S. CHAN es director de la división de comunicaciones del Laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A PRECOMPETITIVE CONSORTIUM ON WIDE-BAND ALL-OPTICAL NETWORKS. Vincent W. S. Chan et al. en *Journal of Lightwave Technology*, volumen 11, n.º 5-6; mayo de 1993.

MULTI-WAVELENGTH TRANSPORT NETWORKS. Peter J. Chidgey en *IEEE Communications*, vol. 32, n.º 12, páginas 28-35; diciembre de 1994.

TOWARD CUSTOMER-USABLE ALL-OPTICAL NETWORKS. Paul E. Green, Jr., en *IEEE Communications*, volumen 32. n.º 12, páginas 44-49; diciembre de 1994.

Inteligencia artificial

Está tomando cuerpo un haz de saberes de sentido común, cuya importancia va a ser crucial

Douglas B. Lenat

DOUGLAS B. LENAT preside la compañía Cycorp y enseña informática en Stanford.

Una de las lecciones más exasperantes que la informática nos ha enseñado hasta la náusea es que muchas de las acciones que consideramos difíciles resultan fáciles de automatizar, y viceversa. En 1944, decenas de personas invirtieron meses en los cálculos requeridos por el proyecto Manhattan; en nuestros días, la técnica para hacer lo mismo cuesta pocas pesetas. Por contraste, ninguno de los investigadores que en el verano de 1956 se reunieron en la Universidad de Darmouth con el propósito de poner los cimientos de la inteligencia artificial (IA) podía imaginar que, cuarenta años después, se hubiera progresado tan poco.

A decir verdad, los magros éxitos de la IA ha sacan a la luz las flaquezas del razonamiento computarizado, al igual que muestran lo restringido de sus virtudes. En 1965, el proyecto Dendral de la Universidad de Stanford logró un alto nivel de razonamiento automático en lo tocante a estructuras químicas. Dendral generaba una lista de las posibles estructuras tridimensionales que podría tener un compuesto y aplicaba después un conjunto reducido de reglas sencillas para seleccionar las estructuras más plausibles. De igual manera, en 1975 un programa llamado Mycin lograba superar la precisión de un médico típico en los diagnósticos de meningitis. El programa aplicaba rigurosamente criterios que especialistas muy duchos habían ido desarrollando con los años para diferenciar las tres causas de esta enfermedad. Las tareas de este tipo resultan mucho más adecuadas para un ordenador que para un cerebro humano, debido a que pueden codificarse mediante un número reducido de reglas a seguir: los ordenadores pueden repetir interminablemente unas mismas operaciones sin cansarse.

Por otra parte, muchas de las tareas que las personas realizan sin dificultad —como identificar una palabra farfullada en una conversación o reconocer el rostro de un amigo— resultan imposibles de automatizar. ¿Quién es capaz de poner por escrito las reglas para identificar un rostro?

El resultado es que al lado de los prodigiosos avances de las redes informáticas, de los agentes de interfaz con el usuario y de los equipos propiamente dichos, la IA parece ir rezagada. Tras sus éxitos iniciales, que suscitaron grandes expectativas en los años setenta y ochenta, se produjo una reacción contraria. Hace once años, justamente cuando la manía alcanzaba niveles máximos, escribí un artículo para INVESTIGACIÓN Y CIENCIA [“Programación de sistemas inteligentes”, noviembre de 1984] en el que osaba mostrarme pesimista sobre el decenio venidero. Y ahora que el mundo ha renunciado casi por completo al sueño de la inteligencia artificial, yo estoy convencido de que ésta se encuentra a punto de lograr el éxito.



POR SENCILLAS QUE SEAN, todas las tareas que realizamos exigen sentido común. Si queremos, por ejemplo, hallar imágenes de personas mojadas (*izquierda*) podemos revisar una extensa lista de pies de foto y seleccionar las candidatas verosímiles aplicando al mundo conocimientos de sentido común, aunque la descripción de la imagen no

Muéstrame una persona mojada

Salvador García al terminar un maratón en 1990.

Mis desalentadores pronósticos se debieron a que los programas con que se alimentaba la promoción de la IA no eran auténticos sabios, sino sabios idiotas. Los sistemas expertos solían acertar en los ámbitos específicos para los que habían sido construidos, pero eran quebradizos en extremo. Al proponerles un problema sencillo que se saliera de su especialidad, aunque fuera sólo un poco, proporcionaban soluciones erróneas.

Además, estos programas no podían compartir sus conocimientos. Mycin no podía comunicar con programas para el diagnóstico de enfermedades pulmonares ni asesorar a los médicos sobre quimioterapia para un cáncer, y ninguno de los programas médicos podía comunicar con sistemas expertos en planificación que pudieran tratar de la distribución de los recursos hospitalarios. Cada programa representaba su porcioncita del mundo de formas idiosincrásicas e incompatibles, porque sus creadores habían simplificado demasiado e introducido muchos supuestos específicos de la tarea. Así sigue ocurriendo hoy.

Tanta es la facilidad con que las personas compartimos conocimientos que rara vez nos detenemos a pensar en ello. Eso dificulta todavía más la construcción de programas que hagan otro tanto. Muchas de las destrezas y supuestos tácitos previos han quedado sobreentendidos merced a milenios de evolución bioquímica y cultural y gracias a experiencias infantiles, universales y muy tempranas. Antes de que

"Correr un maratón implica correr por lo menos un par de horas."

```
(Implica (∈ e CorrerUnMaratón)
        (Y (∈ e Correr)
        (duración e (IntervalMin (HorasDuración 2)))
        (Implica (realizadoPor e x) ∈ x Persona))))
```

Salvador García es una persona que ha estado corriendo más de dos horas.

"Correr entraña un gran esfuerzo físico."

```
(Implica (Y (∈ e Correr) (realizadoPor e x))
        (nivelDeEjercicioFísico x e Grande))
```

Salvador García ha estado realizando un gran esfuerzo físico durante más de dos horas.

"Las personas sudan cuando hacen algo con gran esfuerzo; por lo general comienzan a sudar al cabo de 10 minutos y continúan haciéndolo al menos un par de minutos más después de cesar en esta actividad."

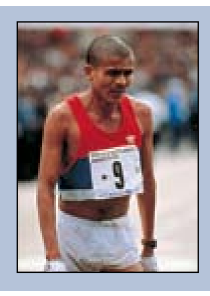
```
(Implica (Y (∈ x Persona)
        (nivelDeEjercicioFísico x e Grande)
        (duración e (IntervalMin (MinutosDuración 10))))
    (ExisteAllí s
      (Y (∈ s Sudación)
          (producidaPor s x)
          (transitoriamenteSubsume
           s
           (IntervaloTempDesde
             (FechaDespuésDe (ComienzoDe e) (minutosDuración 10))
             (FechaDespuésDe (FinalDe e) (minutosDuración 2)))))))
```

Salvador García está sudando.

"Cuando uno suda, se moja."

```
(Implica (Y (∈ e Sudación) (producidaPor e x))
        (presenteEn e (mojaduraDeObjeto x Mojado)))
```

contenga sinónimos de "mojado". También un programa con acceso al mismo tipo de conocimiento puede realizar esta tarea, recorriendo una breve cadena de inferencias (*derecha*) para decidir si cierto pie viene al caso. Empero, sin estos pocos elementos de saber vulgar, ningún razonamiento sería suficiente.



Salvador García está mojado.

las máquinas puedan compartir conocimientos con tanta versatilidad, será preciso recopilar aquellos requisitos previos y hacerlo de formas explícitas y computables.

Durante el decenio pasado, los investigadores del proyecto CYC, de Austin, han estado trabajando en eso. En principio, examinaron fragmentos de artículos, noticias y novelas; estudiaron anuncios y similares, preguntándose en cada frase: "¿Qué presumía el autor que el lector sabía ya?" Era ese conocimiento previo, no el contenido del texto, lo que había de codificarse. Este proceso ha llevado al grupo a representar 100.000 conceptos distintos y alrededor de un millón de fragmentos de conocimientos "de sentido común" concernientes a ellos.

Muchas de tales entidades —por ejemplo, "CuerpoDeAgua"— no corresponden a una única palabra. Recíprocamente, una preposición inocua, como "en", puede tener un par de docenas de significados, correspondientes cada uno a un concepto distinto. La forma en que el lector se encuentra en una habitación difiere de la forma en que lo está el aire, la alfombra, la pintura de las paredes y una carta guardada en el cajón de su escritorio. Cada una de las formas en que algo puede hallarse "en" un lugar entraña diferentes consecuencias; la carta, por ejemplo, puede sacarse de la habitación, el aire.

La mayoría de estos elementos de información no resultaron ser hechos tomados de un almanaque ni definiciones extraídas de un diccionario, sino observaciones comunes y creencias generalizadas. Hubo que enseñarle a CYC cómo se toma la sopa, que muchos niños le tienen miedo a los animales y que, en la mayoría de los países, la policía va armada.

Para complicar las cosas todavía más, muchas de las observaciones que hemos incorporado a la base de conocimientos de CYC se contradicen entre sí. Cuando un programa basado en conocimientos llega a contener más de 10.000 reglas —el 1 por ciento del tamaño de CYC— resulta difícil añadir nuevos conocimientos sin interferir con elementos ya presentes. Hemos superado este obstáculo dividiendo la base de conocimientos en centenares de microteorías, o si se quiere, contextos. Al igual que las piezas de una armadura, cada contexto es rígido y coherente, pero las articulaciones permiten aparentes contradicciones entre contextos. CYC sabe que Drácula era un vampiro, pero al mismo tiempo sabe también que los vampiros no existen.

Los contextos de ficción son de gran interés, porque le permiten a CYC comprender metáforas y valerse de analogías para resolver problemas. La multiplicidad de contextos también resulta útil para razonar en diferentes niveles de detalle, para captar las convicciones de distintos grupos de edad, de distintas nacionalidades o épocas históricas, y para describir diferentes programas, cada uno de los cuales hace sus propias hipótesis sobre la situación en que se utilizará.

La amplitud del conocimiento de CYC resulta evidente incluso en una sencilla aplicación de recuperación de datos que hemos construido en 1994, y que se encarga de buscar imágenes cuyas descripciones atiendan a los criterios que seleccione un usuario. En respuesta a una solicitud de figuras que contuvieran personas sentadas, CYC localizó este pie de foto: "Hay coches. Están en una calle. Hay árboles en un lado de la calle. Se les está cayendo la hoja. Algunos son taxis amarillos. El perfil de Nueva York está en el fondo. Hace sol." El programa utilizó después su formalización del sentido común atinente a coches —que tienen un asiento de conductor, que los coches en movimiento suelen ser conducidos— para deducir que había buenas posibilidades de que la imagen viniera al caso. CYC pudo, análogamente, atender la petición "Muéstrame personas felices" y proporcionar una imagen cuyo pie decía "Un hombre viendo a su hija aprender a andar." Ninguna de las palabras es sinónima y ni siquiera está relacionada de cerca con las de la petición, pero un poco de sentido común permite establecer el vínculo.

CYC dista mucho de estar terminado, pero se está aproximando al nivel en que puede ser la semilla desde la que desarrollar una base de conocimiento compartido. Los programas capaces de comprender los lenguajes naturales se valdrán de la base de conocimientos existente para abarcar textos cargados de ambigüedades y metáforas; la información extraída de las lecturas de CYC aumentará sus conceptos y hará posibles ampliaciones adicionales. CYC aprenderá también a través del descubrimiento, formando y verificando hipótesis plausibles acerca del mundo. Una de las analogías más llamativas que CYC descubrió y exploró fue la existente entre un país y una familia.

A lo largo del decenio venidero, los investigadores enriquecerán la base de conocimiento compartido de CYC por medios manuales y automáticos. Comenzarán a construir aplicaciones, a dotar de sentido común a tipos de auxiliares informáticos que nos son habituales, como las hojas de cálculo, las bases de datos, los sistemas de preparación de documentos y los agentes de búsqueda "en línea".

Los procesadores de texto no sólo verificarán la ortografía y la sintaxis, sino también el contenido: si les prometemos a los lectores tratar más adelante cierto asunto, y dejamos de hacerlo, puede que aparezca una advertencia en nuestra pantalla. Las hojas de cálculo resaltarán aquellas entradas que aun siendo permisibles vayan contra el sentido común. Los programas de recuperación de documentos comprenderán lo suficiente acerca del contenido de lo que están buscando para hallar los textos requeridos, con independencia de que presenten o no las palabras que se le especifiquen.

Los programas de esta clase actuarán de consuno con las tendencias existentes en los equipos y redes informáticas, encaminadas a hacer cada vez más económicos y ubicuos los servicios de naturaleza informática, a construir modelos de usuario y agentes informáticos cada vez más perfectos, con el fin de sumergir más profundamente al usuario en ambientes virtuales. La meta de una IA general está a la vista, y en consecuencia, el siglo XXI experimentará un cambio radical. Allen Newell asimilaba la edad venidera con el país de las hadas: objetos inanimados como los electrodomésticos conversando con nosotros, amén de conversar y coordinarse entre sí. Empero, a diferencia de las criaturas de casi todos los cuentos de hadas, estarán tramando hacernos el bien, no el mal.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BUILDING LARGE KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS: REPRESENTATION AND INFERENCE IN THE CYC PROJECT. Douglas B. Lenat y R. V. Guha. Addison-Wesley, 1989.

STEPS TO SHARING KNOWLEDGE. Douglas B. Lenat en *Toward Very Large Knowledge Bases*. Dirigido por N. J. I. Mars. IOS Press, 1995.

Programas inteligentes

Dotados de funcionamiento autónomo, los agentes aliviarán las cargas de los usuarios

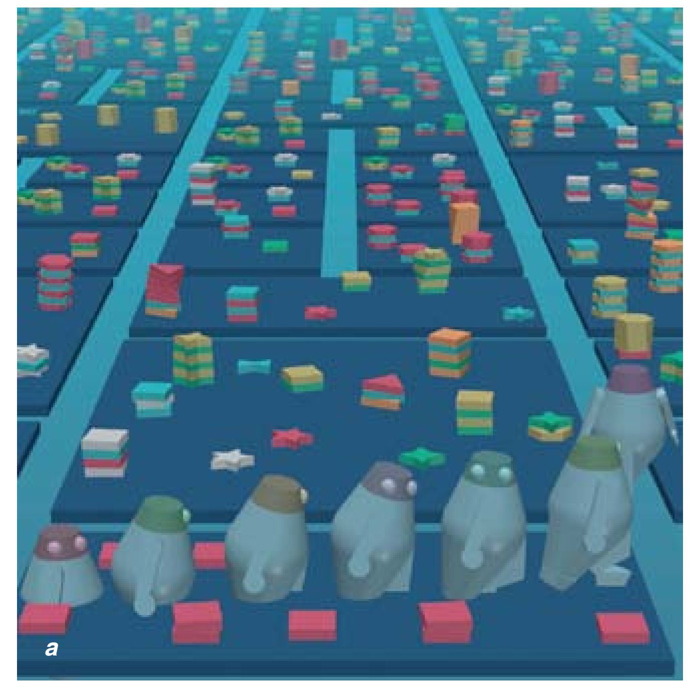
Pattie Maes

Los ordenadores son tan ubicuos como los automóviles y las tostadoras de pan, pero sacar partido de sus capacidades parece exigir todavía la preparación de un piloto de reactores. En todo el mundo, el parpadeo incesante de las cifras 00:00 en los magnetoscopios domésticos da prueba de esta paradoja. A la vez que proliferan la televisión interactiva, los asistentes y agendas electrónicas de bolsillo, amén de las tarjetas de crédito "inteligentes", el vacío que separa a millones de usuarios inexpertos de igual número de refinados microprocesadores se va haciendo evidente con creciente nitidez. Puesto que las personas pasan cada vez mayor proporción de su vida frente a las pantallas de los ordenadores, forzoso resulta hallar acomodo entre los limitados períodos de atención de los humanos y las colecciones de datos y programas, cada vez más complejas.

En la actualidad, los ordenadores responden únicamente a lo que en el diseño de interfases se denomina "manipulación directa". Nada sucede mientras no haya una persona que dé órdenes desde un teclado, un ratón o una pantalla táctil. El ordenador es un mero ente pasivo, a la espera de ejecutar instrucciones específicas y minuciosamente detalladas.

Para que los ordenadores y las redes del futuro puedan utilizarse eficazmente por consumidores inexpertos, la manipulación directa habrá de ceder el paso a ciertas formas de actuación delegada. Los investigadores y las compañías del sector han depositado grandes esperanzas en los "agentes informáticos" —por brevedad, "agentes"— que "conocen" los intereses del usuario y actúan de forma autónoma en su nombre. Las personas, en vez de ejercer control absoluto sobre el ordenador (y asumir la responsabilidad de cada una de sus acciones), participarán en un proceso cooperativo, en el que humanos y agentes establecen comunicación, supervisan los acontecimientos y realizan tareas encaminadas a lograr los objetivos de los usuarios.

La persona corriente tendrá otros muchos "alter egos" —de hecho, intermediarios digitales— operando simultáneamente en distintos lugares. Algunos de estos intermediarios se limitarán a hacer que el mundo digital resulte menos abrumador al ocultar los detalles técnicos de las tareas y guiar al usuario a través de complejos espacios cibernéticos "en línea" e incluso enseñándole ciertas cosas. Otros se dedicarán a la búsqueda de informaciones que pudieran interesar a sus propietarios o a la supervisión de asuntos específicos, en espera de cambios críticos. Otros agentes, empero, podrían disponer de autoridad para efectuar transacciones (por ejemplo, telecompras) o para representar a personas durante la ausencia de éstas. Como ya nos ha hecho atisbar la proliferación de agendas, sean de papel o electrónicas, los agentes se con-





1. LA EVOLUCION ARTIFICIAL produce agentes informáticos capaces de hallar información acorde con los criterios del usuario. En esta representación esquemática de un sistema construido por la autora, los agentes empiezan examinando elementos de información (*bloques rojos*) que su propietario ha encontrado interesantes (*a*) y después se dispersan en busca de materiales

vertirán en eficaces secretarios personales.

Lo más probable es que este cambio de funcionalidad avance codo a codo con cambios en la interacción física con los ordenadores. En lugar de manipular teclados o ratones, a los agentes se les hablará o se les indicará con gestos lo que es necesario hacer. En respuesta, los agentes se mostrarán en la pantalla como entes "vivos", dándonos cuenta de su estado y su comportamiento por medio de animaciones de la expresión facial o recurriendo al lenguaje corporal, en vez de hacerlo mediante ventanas con textos, gráficos y cifras.

Aunque no hay dificultad en imaginar las tareas que nos gustaría encargar a los agentes, su construcción se presenta bastante más problemática. La principal diferencia entre los programas agentes y los ordinarios estriba en lo que podríamos describir como un sentido de sí mismos con carácter de entidad independiente. El agente ideal habría de saber cuál es su misión y esforzarse en cumplirla. Los agentes deberían asimismo ser robustos y adaptables, capaces de aprender de la experiencia y de responder ante situaciones imprevistas con un repertorio de diferentes métodos. Tendrían, finalmente, que ser autónomos, de modo que pudieran percibir el estado actual de su ambiente y ser capaces de desenvolverse para progresar hacia su objetivo.

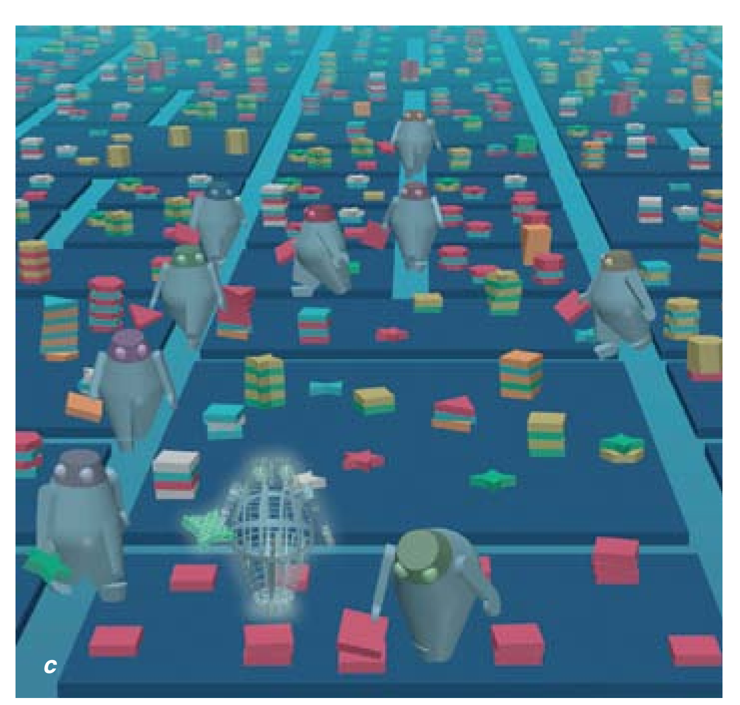
Si los programadores ya tropiezan con dificultades para confeccionar programas ordinarios, ¿cómo podrán crear agentes? La verdad es que los agentes informáticos hoy disponibles en el mercado apenas merecen tal nombre; lo típico es que se atengan a una serie de reglas especificadas por el usuario. Algunos programas de correo electrónico permiten al usuario la creación de un agente que clasifique los mensajes recibidos atendiendo al remitente, al tema o al contenido. Un directivo podría establecer la norma de que se enviara a uno de sus auxiliares una copia de todos los mensajes que contuvieran la palabra "reunión". El valor de un agente tan mínimo depende por completo de la iniciativa y destreza programadora de su propietario.

Los investigadores en inteligencia artificial han venido persiguiendo métodos más complejos de construcción de agentes. En ingeniería del conocimiento a los programas se les dota de información relativa a las tareas que se han de llevar a cabo en un dominio específico; el programa infiere entonces cuál ha de ser la respuesta idónea para una situación dada. Por ejemplo, en el caso del correo electrónico, un agente cartero podría saber que los destinatarios tal vez dispongan de auxiliares administrativos; que el usuario tiene un ayudante que se llama Jorge; que un ayudante debe conocer el calendario de reuniones de su jefe y que un mensaje que contenga la palabra "reunión" puede contener información sobre fechas y horas. Provisto de este conocimiento, el agente sacaría la conclusión de que debe enviar una copia del mensaje.

Se ha estado tratando de construir agentes de este tipo, basados en conocimientos, desde hace cuarenta años. Por desdicha, este método todavía no ha fructificado en agentes comercialmente disponibles. Aunque se ha logrado codificar numerosos dominios restringidos, no se ha podido construir una base que contenga toda la información "de sentido común" que un agente podría requerir para operar por su cuenta. En el momento actual, la única tentativa de sistematización de tal conocimiento tiene lugar en el proyecto CYC de Cycorp, de Austin.

Tanto los limitados agentes en uso como las versiones que se están preparando en inteligencia artificial descansan en programas. Un tercer enfoque, tal vez más prometedor, se inspira en técnicas desarrolladas en la vida artificial,

PATTIE MAES es profesora del Instituto de Tecnología de Massachusetts.





similares (*b*). Los que regresan con datos irrelevantes se eliminan (*c*); los que entregan documentos útiles se reproducen (creando descendencia que combina sus características) y vuelven a salir de búsqueda (*d*). Al cabo de algunas generaciones, la población agente llega a satisfacer las necesidades del usuario; si los requisitos cambian, la especie digital se adaptará.

Atento

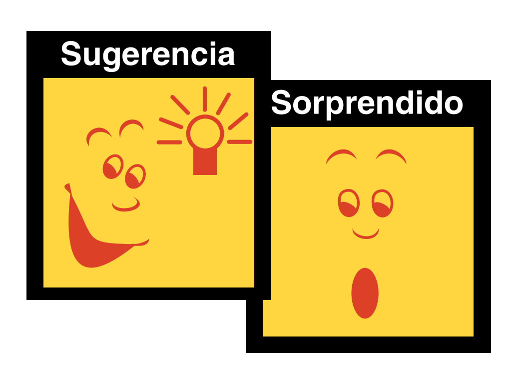
Pensando

Indeciso

Confundido

Satisfecho

Complacido



2. LOS ICONOS informan al usuario del estado actual del agente. Se han simplificado deliberadamente los rostros para evitar que el agente dé la impresión de poseer mayor inteligencia de la que realmente tiene.

joven especialidad que estudia los mecanismos por los cuales los organismos se organizan a sí mismos y se adaptan en respuesta a su ambiente. Pese a su carácter rudimentario, los agentes de vida artificial son autónomos: en efecto, se programan a sí mismos. Se han diseñado para que modifiquen su comportamiento basándose en la experiencia y en las interacciones con otros agentes. En el Instituto de Tecnología de Massachusetts hemos construido agentes informáticos que observan continuamente las acciones de una persona y automatizan las regularidades que detectan en su conducta. Un agente cartero podría caer en la cuenta de que el usuario siempre envía una copia de los mensajes que contienen la palabra "reunión" a un auxiliar administrativo, pudiendo entonces ofrecerse para hacer lo mismo automáticamente.

Los agentes pueden aprender de agentes que llevan a cabo la misma tarea. Ante un mensaje desconocido, un cartero electrónico podría interrogar a sus homólogos y averiguar, por ejemplo, que las personas acostumbran leer el correo que les es dirigido antes que los mensajes dirigidos a una lista de correo. Tal colaboración puede conseguir que colecciones de agentes actúen de forma elaborada e inteligente.



Con el transcurso del tiempo, la "evolución artificial" puede codificar y combinar en un sistema las conductas de los agentes más eficaces (según el juicio de sus poseedores) con el propósito de engendrar una población mejor adaptada todavía. Mis colegas y yo hemos construido un sistema así con la intención de desarrollar agentes que examinen una base de datos y localicen artículos que pudieran interesar a sus usuarios. Cada una de las sucesivas generaciones va atendiendo mejor los intereses de su propietario.

Andando el tiempo, este método podría desembocar en un ecosistema electrónico alojado en las redes informáticas del siglo venidero. Los agentes que les resulten útiles a sus dueños o a otros agentes funcionarán con mayor frecuencia, sobrevivirán y se reproducirán; los inoperantes acabarán expurgados. Con el tiempo, estas formas de vida digital terminarán por ocupar diferentes nichos ecológicos: ciertos agentes podrían evolucionar hasta convertirse en diestros indizadores de bases de datos, mientras otros se valdrán de dichos índices para hallar artículos de interés para un determinado usuario. Se darán casos de parasitismo, de simbiosis y de otros muchos fenómenos que nos son familiares en el mundo biológico. Al ir variando las demandas de información llegadas del exterior, el ecosistema informático irá sin cesar renovándose a sí mismo.

Como es obvio, la amplia diseminación de agentes tendrá un enorme impacto social, económico y político. Los agentes provocarán una revolución social: prácticamente todo el mundo tendrá acceso a la clase de personal auxiliar que hoy constituye el distintivo de unos pocos privilegiados. Podrán, en consecuencia, extractar grandes cantidades de información y emprender simultáneamente varias actividades distintas. Las ramificaciones últimas de este cambio resultan imposibles de predecir.

La forma de los cambios que los agentes van a introducir dependerá, como es obvio, de la forma en que se utilicen. Son muchas las preguntas que han de recibir respuesta; otras no se han formulado todavía. Por ejemplo, ¿deben los usuarios ser considerados responsables de las acciones de sus agentes? ¿Cómo garantizar que un agente guarde en secreto toda la información de índole personal que acumula sobre su propietario?

¿Habrán los agentes de automatizar los malos hábitos de sus propietarios, o deberán enseñarles otros mejores? En tal supuesto, ¿quién va a determinar el significado de "mejor"? Conforme vaya aumentando la complejidad y refinamiento del ecosistema electrónico, ¿será posible garantizar que todavía quede suficiente capacidad de cómputo, y, en las comunicaciones, suficiente anchura de banda, para la miríada de tareas que los humanos deseamos ver realizadas? Los experimentos de limitado alcance que hasta el presente han llevado a cabo los investigadores ofrecen tan sólo atisbos de las posibilidades que ahora se están abriendo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INTELLIGENT AGENTS. Número especial de *Communications of the ACM*, vol. 37, n.º 7; julio de 1994.

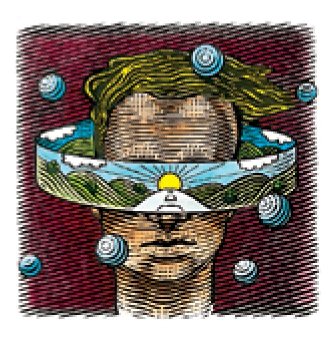
OUT OF CONTROL: THE NEW BIOLOGY OF MACHINES, SOCIAL SYSTEMS AND THE ECONOMIC WORLD. Kevin Kelly. Addison-Wesley, 1995.

Página de portada del Media Lab del M.I.T. en la World Wide Web: http://www.media.mit.edu/

Realidad virtual

La realidad virtual transformará a los ordenadores en prolongación de nuestro cuerpo

Brenda Laurel



Desde que empezaron a cantarse sus excelencias, mediados los ochenta, la realidad virtual y sus accesorios —cibernautas provistos de protuberantes anteojos y guantes cargados de sensores— han cautivado el interés del público. Empero, las técnicas utilizadas para sumergir a las personas en mundos informáticamente generados van a cambiar de forma radical a lo largo del decenio venidero, y con ellas, el hoy enmascarado cibernauta se tornará en figura tan curiosa e insólita como los primeros exploradores submarinos, con sus pesadas escafandras y sus cascos de bronce.

En la realidad virtual lo importante es lo que se hace, no la forma en que se consiguen sus efectos: permite conducirnos como si nos halláramos donde no estamos. Dicho lugar puede consistir en una ficción computarizada o en la recreación de un ambiente tomado de otro lugar u otro tiempo. La realidad virtual transporta percepciones incidiendo sobre varios sentidos a la vez —la vista, el oído, el tacto— y presentando imágenes que responden en el acto a los movimientos propios. Las técnicas para crear estas ilusiones varían en función del tipo de lugar que se está visitando y de lo que el usuario pretenda hacer mientras se encuentra allí. Por ejemplo, en un simulador de vuelo, podrían ser necesarios actuadores hidráulicos para reproducir los picados o las viradas, mientras que un bioquímico que explorase los enlaces moleculares podría precisar de sensores de posición especialmente finos y de mecanismos para "palpar" las fuerzas interatómicas.

Los decenios venideros traerán perfeccionamientos impresionantes de las aplicaciones existentes, merced a una computación más rápida y más "inteligente" y a una técnica de interfaz mucho mejor. Las pantallas estereoscópicas actuales, voluminosas y pesadas, serán reemplazadas por "gafas" livianas y capaces de superponer imágenes sintetizadas a las del mundo real. Los engarces de dispositivos sensores y de seguimiento quedarán integrados en las prendas de vestir, o se sustituirán por cámaras de vídeo u otros sensores capaces de controlar los movimientos a distancia. Se dispondrá también de técnicas que simulen las sensaciones de fuerza, resistencia, textura y olor.

En un principio, estos nuevos equipos harán que las aplicaciones existentes funcionen con rapidez y comodidad mayores. Ya se están desempeñando tareas complejas y delicadas en ambientes peligrosos, como el espacio o el interior de reactores nucleares. Los pilotos y los astronautas se entrenan en cabinas de realidad virtual, que funden gráficos en perspectiva con imágenes de lo situado tras el parabrisas, dotadas además de sistemas de sonido que apuntan lo que sucede a su alrededor. Los arquitectos y planificadores pueden "pasear" por los ambientes que diseñan para mejor percibir la sensación de quienes vivieran o trabajaran en su interior.

Conforme vaya evolucionando la programación, conforme se multiplique la potencia de cómputo, se recurrirá a la realidad virtual para presentar modelos de sistemas complejos de todo tipo, desde las inversiones personales hasta la economía planetaria y desde los microorganismos hasta las galaxias. A lo largo de los últimos diez años, los éxitos de las técnicas de visualización en el ámbito científico pusieron de relieve cómo se puede aprovechar la capacidad de las personas para detectar regularidades en datos adecuadamente presentados; pronto resultará posible que participen a la vez varios sentidos, y generar en la mente y en el cuerpo respuestas que sean más que la suma de sus partes.

También las aplicaciones sociales de la realidad virtual constituirán una fuerza importante en su evolución. Los investigadores han demostrado que incluso en ambientes sencillos de comunicación en línea de información textual resulta esencial el sentido del lugar. En el mundo real se dedica muchísima energía a la creación de lugares especiales que proporcionen contexto para la interacción social —pensemos en los escaparates, en la arquitectura y el interiorismo. La realidad virtual hará posible el traslado al ciberespacio de muchas de esas destrezas. Conforme los espacios virtuales vayan adquiriendo una textura más rica y compleja, la realidad virtual echará los cimientos de una gran transformación en el *ethos* de la informática. Los ordenadores se han considerado hasta ahora la última parada de la ruta de la dualidad entre mente y cuerpo: su proximidad al pensamiento incorpóreo es la máxima que el mundo material consiente. Por lo general, los ordenadores carecen de órganos sensoriales y tampoco se comunican especialmente bien con los sentidos de los humanos. Su evolución ha sido la de seres con sólo cabeza y faltos de cuerpo, condenados por los arcanos de sus mecanismos de comunicaciones a conversaciones extremadamente sucintas con unas personas que son casi tan extrañas como ellos.

La realidad virtual, en contraste, apenas establece distingo entre la mente y el cuerpo. Se vale, en cambio, en el ámbito de un contexto nuevo, de los sentidos corporales que tan magníficamente ha preparado la evolución. A la realidad virtual le interesa la naturaleza del cuerpo —el funcionamiento de nuestros sentidos, la forma en que nos movemos, cómo tenemos la sensación de encontrarnos en cierto lugar y el modo en que nos afecta la sensación de estar allí. Se ocupa también de la representación de la naturaleza de las cosas, tanto virtuales como reales, interesándose por la forma en que revelan su estructura, su dinámica y sus posibles usos.

BRENDA LAUREL se halla vinculada a Interval Research Corporation de Palo Alto.

Satélites para el Tercer Mundo

Gracias a los satélites la economía de la información podría ser accesible a todas las gentes

Russell Daggatt



La mayoría de los habitantes del planeta no disponen de servicio telefónico. Por citar un dato estadístico, más de la mitad de la población vive a más de dos horas de viaje del teléfono más cercano. Los elevados costos de las infraestructuras de los tendidos alámbricos han sido muchas veces un impedimento para que las telecomunicaciones llegaran a zonas apartadas. Vastas regiones del Tercer Mundo carecen de servicio telefónico. La India, con sus 860 millones de habitantes, tiene sólo siete millones de líneas, concentradas en unas cuantas urbes.

Allá donde se dispone de servicio telefónico, las redes que lo materializan se basan en una técnica que cuenta ya con 100 años de antigüedad (cables de cobre analógicos) y que en su mayor parte jamás se actualizará adaptándola a las características de digitalización y banda ancha necesarias para conectar con las redes avanzadas que conforman las autopistas de la información.

A medida que el trasiego rápido de información se va haciendo imprescindible para las cosas que solemos asociar a un nivel de vida alto (desde la educación y asistencia sanitaria hasta el desarrollo económico y servicios públicos) crece el peligro de que no mejore el nivel de vida, e incluso de que pudiera empeorar, en aquellas zonas carentes de infraestructura de banda ancha.

El futuro es de la fibra óptica, que enlazará países y compañías telefónicas. Pero las conexiones por fibra entre empresas particulares y entre domicilios serán más raras, incluso en los países industrializados. Los sistemas inalámbricos, empleen satélites, transceptores celulares o una combinación de ambos, pueden brindar un medio para extender, a bajo costo, el servicio a regiones infra-atendidas. Pero los satélites y los sistemas celulares no son intercambiables. Para comprender por qué, debemos sumirnos en lo que el porvenir le demandará al mundo subdesarrollado si éste desea participar en la futura economía basada en la información.

La extensa fracción del mundo que no dispone de acceso al servicio telefónico, o sólo dispone de ese acceso a través de sistemas celulares de baja velocidad de transferencia de datos, necesita una técnica complementaria capaz de suministrar, a bajo precio, información en banda ancha y aplicaciones multimedia. No es probable que, en el Tercer Mundo, esas aplicaciones se destinen primordialmente al uso de particulares; antes bien, las compartirán las instituciones (hospitales, escuelas, organismos oficiales y empresas). En la asistencia sanitaria, por ejemplo, los médicos podrán consultar con especialistas radicados a miles de kilómetros de distancia, compartir informes clínicos y registros en imágenes, transmitir informaciones cruciales durante brotes epidémicos, comunicar al mundo entero los últimos resultados de sus investigaciones, disponer las labores de ayuda en los casos de desastres y facilitar instrucciones a distancia acerca de nutrición, higiene y cuidados de la infancia.

Con el acceso universal a las posibilidades interactivas de la banda ancha, la información puede fluir libremente entre las gentes, creando comunidades más abiertas. En este contexto, los sistemas por satélite pueden complementar los sistemas celulares terrestres poniendo a disposición de éstos infraestructuras de información por banda ancha en zonas donde los tendidos alámbricos no sean viables.

Algunas de las ventajas que ofrecen los satélites igualan a las de los sistemas celulares asentados en tierra. Aquéllos pueden servir a vastas regiones a un precio que no depende de su ubicación. Las terminales de satélite pueden desplegarse con mayores rapidez y flexibilidad que las que permite el tendido de un cable. Además, como los abonados no utilizan en exclusiva los canales, los gastos pueden repartirse entre usuarios.

Los satélites poseen algunas ventajas con respecto a los sistemas celulares. Conforme aumentan las distancias entre usuarios y la variabilidad del tráfico, la mayor amplitud de las zonas que cubren los satélites hace que éstos ofrezcan mayor incentivo económico. Además, son invulnerables a las calamidades de la superficie terrestre: terremotos, inundaciones, incendios y huracanes, que paralizan los sistemas de comunicaciones terrestres.

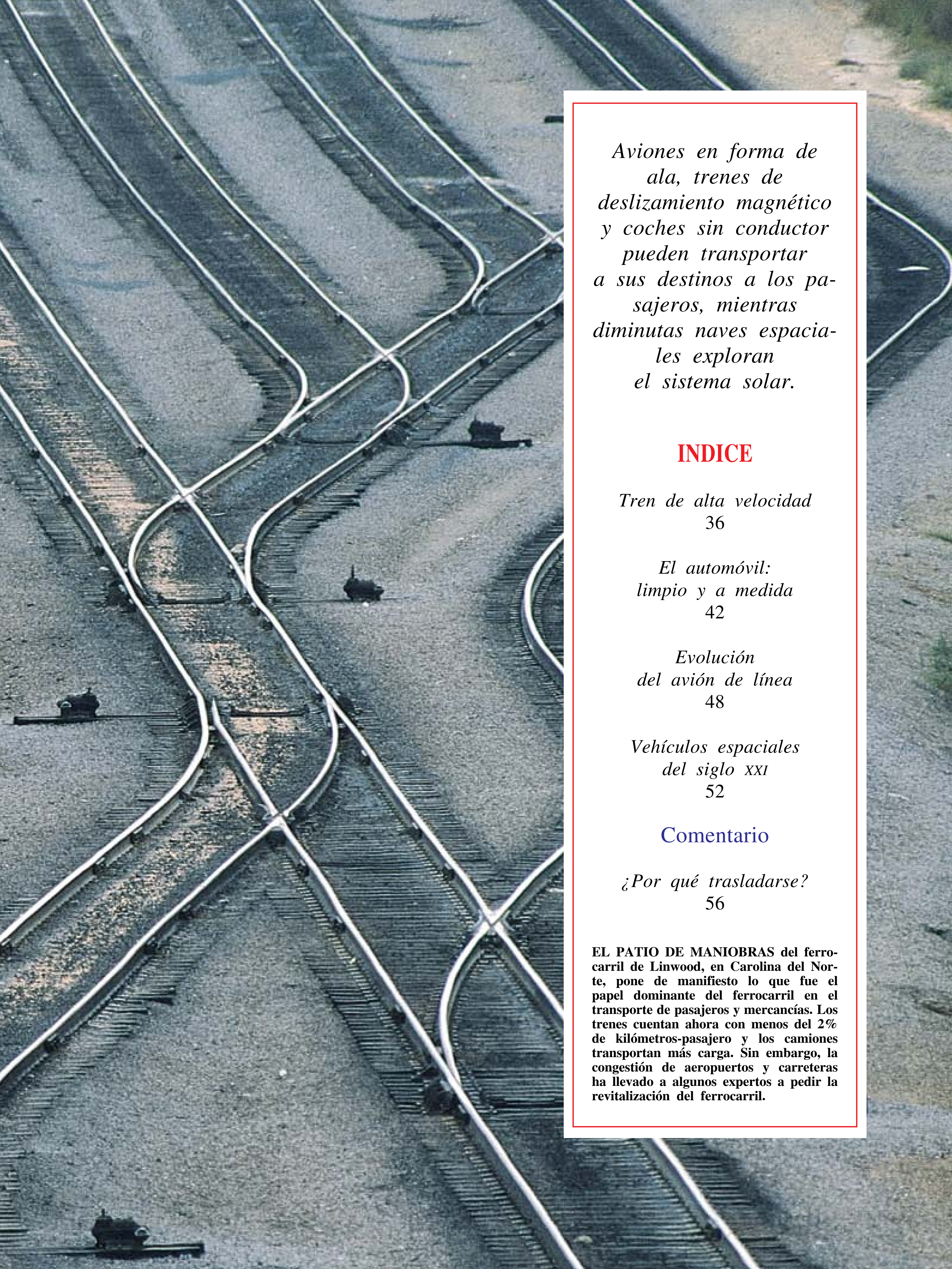
Y acaso más importante sea el hecho de que las comunicaciones vía satélite podrían contribuir a frenar la emigración en gran escala del campo a la ciudad, y del mundo subdesarrollado a los países industrializados. Las técnicas basadas en los tendidos no hacen sino extender el paradigma de la era industrial según el cual la economía de las infraestructuras impulsa a las personas hacia aglomeraciones urbanas superpobladas. Los satélites pueden contribuir a que la gente elija dónde vivir basándose en consideraciones tales como familia, comunidad y calidad de vida, y no en los accesos a las infraestructuras.

La metáfora de la "autopista de la información" es válida en el mismo grado en que la revolución de la información se base en la fibra óptica. Al igual que una autopista, o como el ferrocarril antes de ella, la fibra está rígidamente atada a un emplazamiento concreto. Si hay una ciudad cercana a la línea principal, prosperará; si está a unos cuantos kilómetros se disipará. Particularmente en el mundo de desarrollo, ese modelo resulta cada vez más insostenible. Moviendo información y no personas pueden crearse riqueza y prosperidad sin consumir vastas cantidades de recursos humanos.

RUSSELL DAGGATT preside la empresa Teledesic.

TRANSPORTE





Aviones en forma de ala, trenes de deslizamiento magnético y coches sin conductor pueden transportar a sus destinos a los pasajeros, mientras diminutas naves espaciales exploran el sistema solar.

INDICE

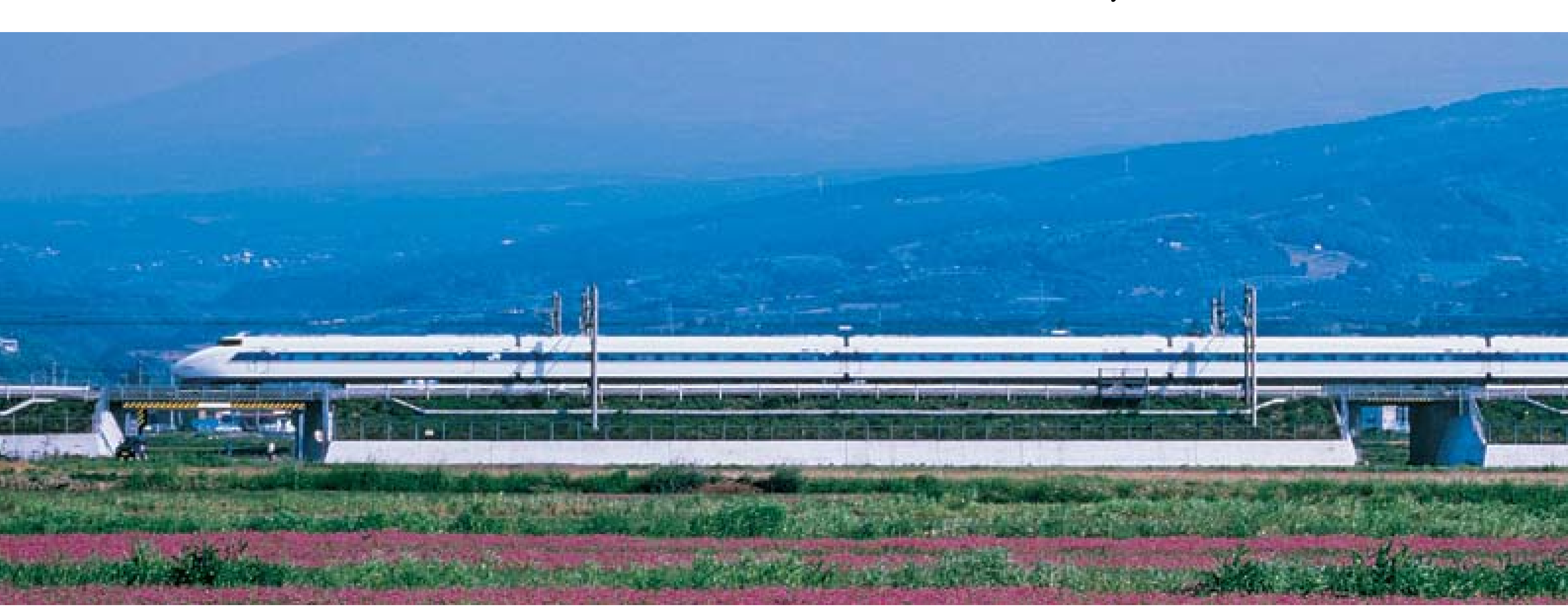
Comentario

EL PATIO DE MANIOBRAS del ferrocarril de Linwood, en Carolina del Norte, pone de manifiesto lo que fue el papel dominante del ferrocarril en el transporte de pasajeros y mercancías. Los trenes cuentan ahora con menos del 2% de kilómetros-pasajero y los camiones transportan más carga. Sin embargo, la congestión de aeropuertos y carreteras ha llevado a algunos expertos a pedir la revitalización del ferrocarril.

Tren de alta velocidad

Potenciados en Europa y Japón, los trenes de alta velocidad son el complemento imprescindible de automóviles y aviones

Tony R. Eastham



1. EL TREN JAPONES “BALA” alcanza los 275 km por hora. Este fotograma corresponde a un punto situado a unos 100 km al suroeste de Tokio, en la dirección de Osaka. La línea original unía las dos ciudades en 1964. Desde entonces la red ha crecido hasta

La época dorada del tren fue, sin duda, el período de entreguerras. Cuando, por ejemplo, de la estación central de Nueva York salían unidades sin cesar hacia los cuatro puntos cardinales: Chicago, Montreal, St. Louis, etcétera. O el tráfico continuo de las de París y Berlín. Largas redes ferroviarias se extendían por Europa y América, transportando pasajeros y mercancías. Famosos fueron, entre los primeros, el Flecha dorada, de Inglaterra, el Orient-Express en el continente y el Céfiro en los Estados Unidos, que ilustraban no sólo la velocidad, la potencia y el confort, sino el propio avance de la técnica.

El tiempo transcurrido desde entonces ha asistido al despegue de la aviación comercial y a la generalizada construcción de autopistas nacionales e internacionales. Tendencia que prosigue afianzada. ¿Qué misión se le reserva al ferrocarril en un mundo de grandes aviones de transporte subsónico y automóviles avanzados que se desplazan por autopistas “inteligentes”?

La respuesta, en muchos países adelantados, es que los trenes desempeñarán un papel muy importante. En esas regiones, los servicios ferroviarios han aumentado drásticamente a través de la evolución de sistemas y técnicas en sociedades que nunca se apoyaron en el automóvil con la entrega que lo hizo Norteamérica. En muchas partes de Europa y Asia, los trenes, más que los aviones, son ahora los medios preferidos de transporte en distancias de 200 a 600 km. La utilización de sistemas de trenes rápidos y tecnológicamente avanzados empezó hace décadas y puede completarse en los próximos años con trenes de deslizamiento magnético (maglev, de “magnetic-levitation”). Los ferrocarriles, de ruedas-de-acero-sobre-vías-de-acero, corren ya a 300 km por hora, y se está investigando y ensayando con trenes de deslizamiento magnético que alcancen entre 400 y 500 km por hora, quizá dentro de los próximos 10 años. Por contra, en Estados Unidos la realización del tren de alta velocidad ha sido de una lentitud exasperante. Los servicios ferroviarios interurbanos y de cercanías dan cuenta de menos del 2% de kilómetros-pasajero al año. Aunque los trenes de mercancías pasan un buen momento, los camiones se han convertido en el transporte dominante.

Existe, sin embargo, un creciente reconocimiento de que la movilidad de gentes y mercancías se ve amenazada por autopistas rápidas que se atascan en entradas y salidas de las áreas metropolitanas, así como por la saturación de los aeropuertos en las horas punta, como el puente aéreo Madrid-Barcelona. Mantener la movilidad y el desarrollo económico requerirá un ajuste equilibrado del transporte ferroviario, aéreo y por carretera. Se propone, pues, un renacimiento del ferrocarril. En Estados Unidos se han

invertido millones de dólares en estudios de sistemas, informes de rutas y valoraciones de la conducción en tramos de tráfico denso entre ciudades que distan entre sí unos centenares de kilómetros.

Estos estudios se han beneficiado de la larga experiencia de otros lugares. En 1964 empezó a funcionar el famoso Shinkansen, "tren bala" japonés que cubría la ruta Tokio-Osaka, de 553 kilómetros. Con el paso de los años, las velocidades han pasado de 210 a 270 km por hora, reduciendo el tiempo del viaje de 4 a 2,5 horas. La red del Shinkansen japonés cubre ahora 2045 km, desde Marioka en el norte de Honshu hasta Hakata en Kyushu, y traslada a 275 millones de pasajeros cada año. Pero el progreso técnico no se ha detenido, situándose en cabeza la Central Ferroviaria de Japón, una de las compañías de trenes regionales del país. Entre los proyectos en curso se halla un supertrén avanzado para un tendido del siglo XXI, el STAR 21, cuyo prototipo ha alcanzado los 425 km por hora.



cubrir unos 2045 kilómetros, desde Morioka, en el norte de Honshu, hasta Hakata, en la isla sureña de Kyushu.

Corresponde, sin embargo, a Francia el mérito de poseer el sistema de tren comercial más rápido del mundo, el tren de alta velocidad ("Train à Grande Vitesse", o TGV). El TGV Atlántico alcanza una velocidad máxima de 300 kilómetros por hora. París forma el centro de una red que se extiende, por el norte, hasta Lille y el Túnel del Canal, por el oeste hasta Tours y Le Mans, y por el sur hasta Lyon. Los trenes TGV operan también en Suiza. En 1992 empezaron a circular en España entre Madrid y Sevilla, y para 1998 está previsto su funcionamiento entre Seúl y Pusan, en Corea.

También Alemania tiene su tren de alta velocidad, el Interurbano Express (ICE), que se desplaza a 250 km por hora entre Hannover y Würzburg, y también entre Mannheim y Stuttgart. Como los de Japón y Francia, este sistema opera con una prioridad determinada, maximizando la seguridad de público y pasajeros mediante la supresión de los pasos a nivel e incorporación de un avanzado sistema de control.

Suecia ha adoptado una fórmula algo diferente con su X2000, que alcanza una velocidad máxima de 220 km por hora en la línea que une Estocolmo con Göteborg, de 456 km; su fórmula aprovecha al máximo la infraestructura ferroviaria existente gracias a la inclinación activa de los compartimentos de los pasajeros con respecto al armazón y ruedas. Esta disposición evita que los pasajeros sufran incómodas fuerzas laterales cuando el tren toma las curvas a gran velocidad. En Italia el tren pendular ETR-450 proporciona un servicio similar entre Roma y Florencia.

En Norteamérica la experiencia con trenes de alta velocidad se ha limitado a estudios y demostraciones de la técnica europea para estimular el interés del público. Muchos informes abonan la conveniencia de trenes de alta velocidad para tramos entre grandes ciudades más o menos próximas: Pittsburgh-Philadelphia, Las Vegas-Los Angeles, San Francisco-Los Angeles-San Diego, Dallas-Houston-San Antonio, Miami-Orlando-Tampa y Toronto-Ottawa-Montreal. Pero no se ha progresado apenas.

Con todo, la empresa ferroviaria Amtrak proyecta significativas mejoras en sus rutas del sector nordeste. Parte de esta red, entre Washington y Nueva York, circula a velocidades de hasta 200 km por hora, y traslada a más pasajeros que cualquier aviocar. En un futuro inmediato Amtrak proyecta firmar un contrato de 700 millones de dólares para la adquisición y mantenimiento de hasta 26 trenes de alta velocidad que circularían en este tramo. Los nuevos trenes unirán Boston, Nueva York y Washington, con un rendimiento de hasta 225 km por hora, cuando hayan terminado las obras de infraestructura, seguramente en 1999. Los trenes se fabricarán en los Estados Unidos, aunque habrá participación del extranjero. Las compañías que pujan por hacerse con el contrato de Amtrak ofrecen técnicas TGV, X2000 e ICE/Fiat.

TONY R. EASTHAM es profesor en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad de Queen, en Canadá.

Muchas de estas prometedoras aplicaciones del tren de alta velocidad proceden de la naturaleza evolutiva de la técnica: la mayoría de los proyectos mantendrán costes bajos al utilizar la infraestructura existente. Ventaja de la que no goza el tren de deslizamiento magnético. Con esta expresión genérica se designa una familia de técnicas caracterizada por la suspensión del tren, guiado y propulsado por fuerzas magnéticas. Debido a la necesidad de una infraestructura radicalmente nueva, el tren de deslizamiento magnético se aplicará sobre todo en enlaces de circulación muy densa, donde los potenciales beneficios justificarán el coste del tendido.

Ese obstáculo explica la dilatada adolescencia en que se ha mantenido confinado al tren de deslizamiento magnético. Las primeras ideas sobre el mismo las esbozaron, hace treinta años, James R. Powell y Gordon Danby, dos físicos del Laboratorio Nacional de Brookhaven, quienes imaginaron un tren con una velocidad de 480 km por hora, suspendido por bobinas magnéticas superconductoras. En el decurso de un década, sin embargo, toda la investigación y el desarrollo se trasladó a Japón y Alemania, países que, con generosa ayuda privada y oficial, siguieron diferentes variaciones técnicas.

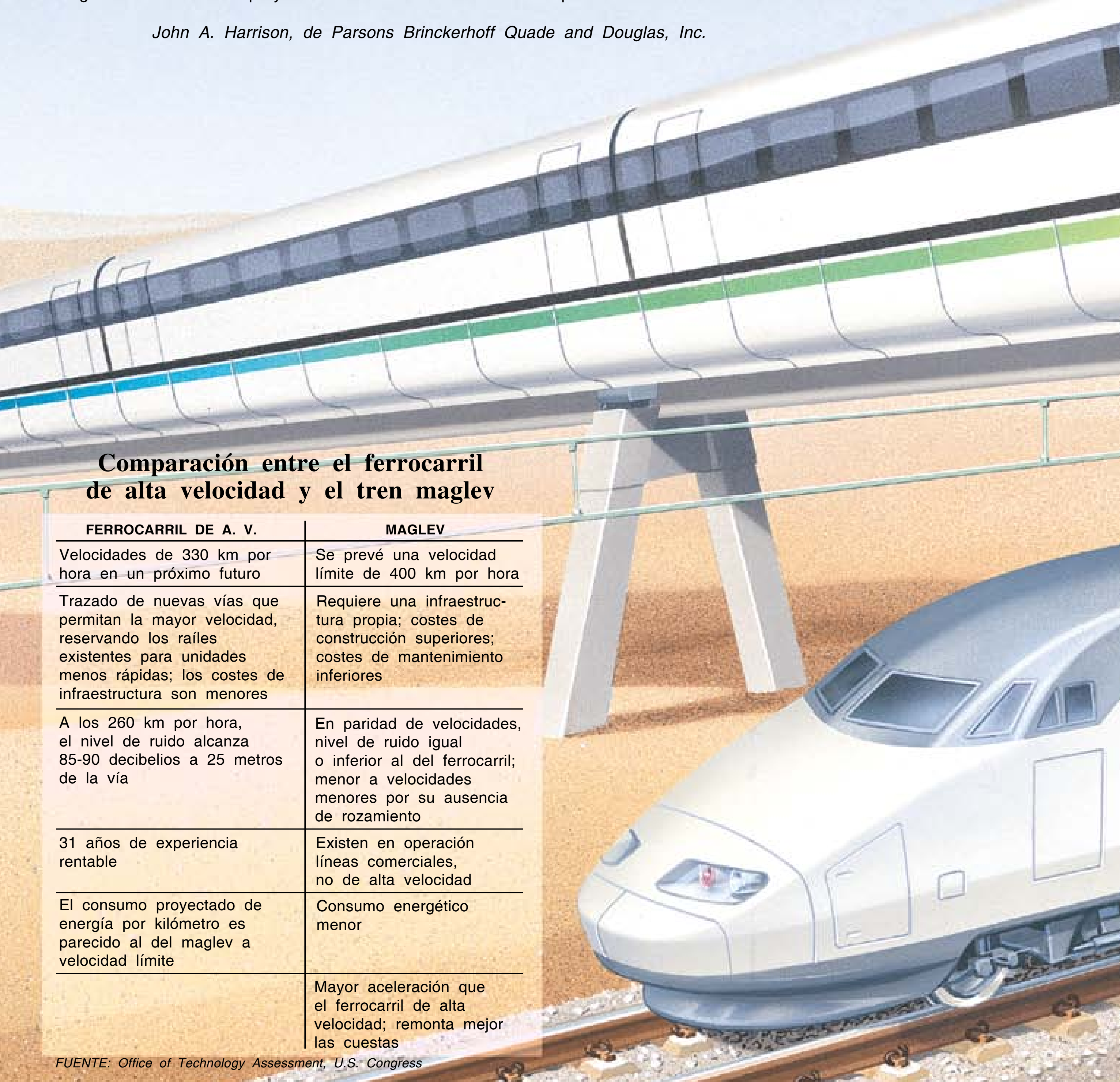
Con el tren de deslizamiento magnético la electricidad de corriente alterna alimenta los carretes distribuidos a lo largo de las guías, creando una onda magnética en la que quedan

Sobre ruedas o en vuelo rasante a 300 km por hora

El transporte terrestre de elite se divide en tres categorías: alta velocidad, muy alta velocidad y deslizamiento magnético (maglev). Los sistemas de alta velocidad, como la línea nordeste de los Estados Unidos que comercializa la empresa Amtrak, emplean el sistema clásico de ferrocarril y puede funcionar a velocidades máximas de 200 a 240 km por hora. Los sistemas de muy alta velocidad consiguen los 350 km por hora merced a una técnica de rodamiento sobre raíl refinada. Se alimentan por energía eléctrica y demandan trazados bastante rectilíneos para poder desarrollar sus elevadas velocidades. El Tren francés de Gran Velocidad (TGV), el Interurbano Express alemán (ICE) y el tren bala nipón (Shinkansen) son todos ellos ejemplos de ferrocarril celerísimo.

Muy distintos son los sistemas maglev. Recurren a fuerzas electromagnéticas para elevarse en suspensión los trenes, dirigirlos y propulsarlos por sus guías a velocidades proyectadas de 320 a 500 kilómetros por hora.

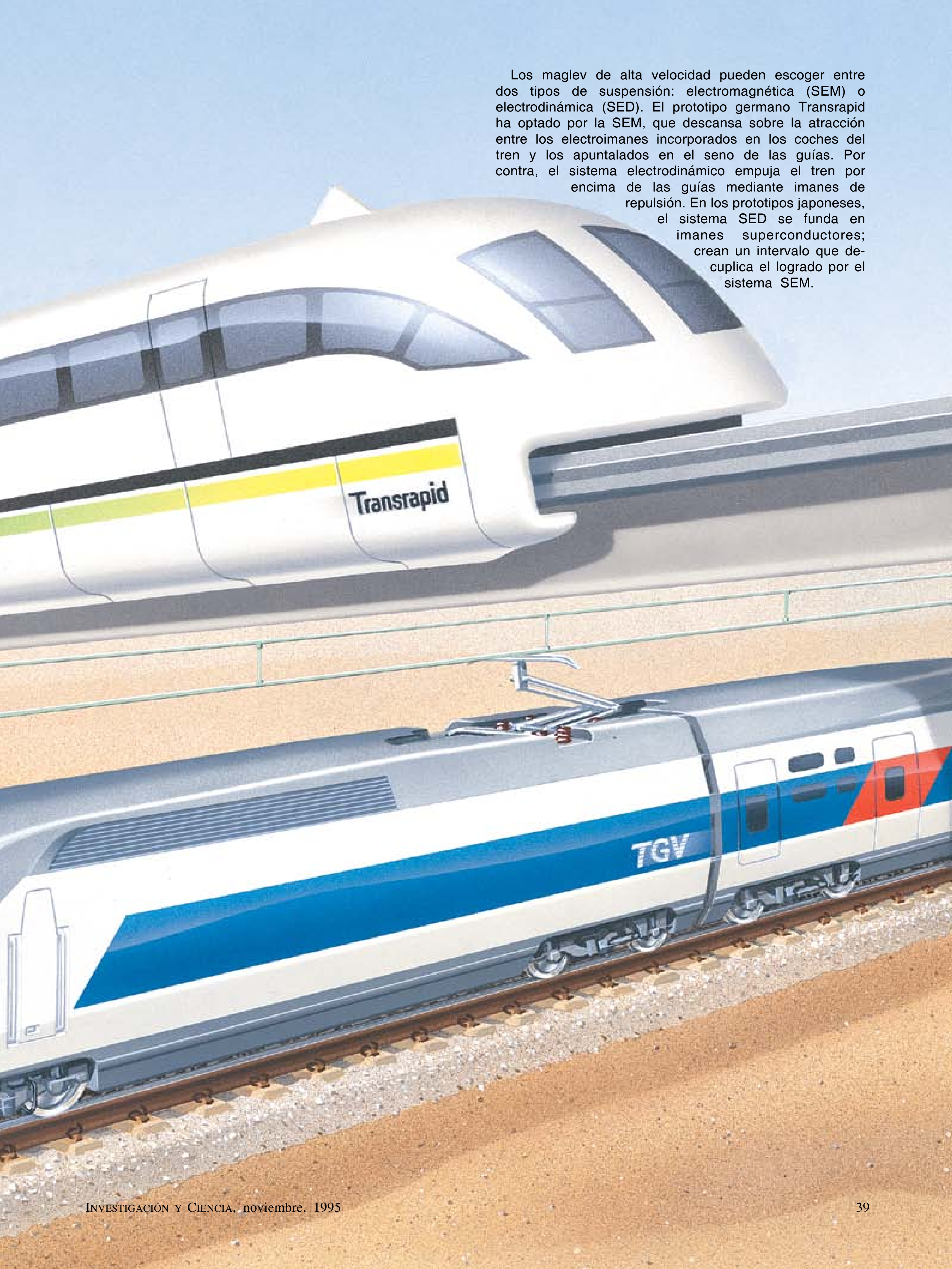
John A. Harrison, de Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas, Inc.



Comparación entre el ferrocarril de alta velocidad y el tren maglev

FERROCARRIL DE A. V.	MAGLEV
Velocidades de 330 km por hora en un próximo futuro	Se prevé una velocidad límite de 400 km por hora
Trazado de nuevas vías que permitan la mayor velocidad, reservando los raíles existentes para unidades menos rápidas; los costes de infraestructura son menores	Requiere una infraestructura propia; costes de construcción superiores; costes de mantenimiento inferiores
A los 260 km por hora, el nivel de ruido alcanza 85-90 decibelios a 25 metros de la vía	En paridad de velocidades, nivel de ruido igual o inferior al del ferrocarril; menor a velocidades menores por su ausencia de rozamiento
31 años de experiencia rentable	Existen en operación líneas comerciales, no de alta velocidad
El consumo proyectado de energía por kilómetro es parecido al del maglev a velocidad límite	Consumo energético menor
	Mayor aceleración que el ferrocarril de alta velocidad; remonta mejor las cuestas

FUENTE: Office of Technology Assessment, U.S. Congress



Los maglev de alta velocidad pueden escoger entre dos tipos de suspensión: electromagnética (SEM) o electrodinámica (SED). El prototipo germano Transrapid ha optado por la SEM, que descansa sobre la atracción entre los electroimanes incorporados en los coches del tren y los apuntalados en el seno de las guías. Por contra, el sistema electrodinámico empuja el tren por encima de las guías mediante imanes de repulsión. En los prototipos japoneses, el sistema SED se funda en imanes superconductores; crean un intervalo que decuplica el logrado por el sistema SEM.



2. INTERIOR del transrápido alemán.

confinados los electroimanes del vehículo. La velocidad se controla variando la frecuencia de la energía eléctrica aplicada a los carretes de las guías. En efecto, los electroimanes del vehículo y los carretes de las guías constituyen un simple motor eléctrico sincrónico, de movimiento lineal, no rotativo.

Existen dos versiones. El llamado sistema electrodinámico de repulsión, propuesto por Powell y Danby, y que han seguido los japoneses, utiliza electroimanes superconductores a bordo del vehículo para inducir corrientes en bobinas conductoras de las guías. Esta interacción eleva el vehículo unos 15 cm sobre el suelo, como si fuera un avión en vuelo rasante, con deslizamiento en su base. Este tren japonés se alza en suspensión magnética a unos 100 km por hora; a velocidades más bajas circula sobre ruedas.

El otro tipo, en el que se ha trabajado en Alemania, es el sistema electromagnético de atracción. Los electroimanes corrientes (no superconductores) de núcleo de hierro que lleva el vehículo son atraídos hacia arriba por los componentes ferromagnéticos que se hallan en la parte interior de la estructura de la guía. Este tipo de suspensión magnética, inestable, requiere un control preciso para conservar un espacio de 1,5 cm aproximadamente entre los electroimanes del tren y la guía. Con todo, tiene la ventaja de que el vehículo permanece suspendido incluso en reposo; gracias a ello sirve para viajes urbanos y de cercanías, así como para recorridos más largos y de alta velocidad. El primer sistema de trenes de deslizamiento magnético fue una lanzadera de baja velocidad que operó en 1984 en Birmingham entre la terminal del aeropuerto y la cercana estación de ferrocarril.

El Instituto de Investigación Técnica del Ferrocarril de Japón, en colaboración con algunas grandes compañías de ingeniería, trabaja en el sistema de repulsión. Una serie de vehículos de prueba incluye el ML-500R, que en 1979 alcanzó una velocidad de 517 km por hora —un récord para un tren de deslizamiento magnético— en una pista de pruebas de 7 km cerca de Miyazaki, en la isla de Kyushu. Su sucesor, un vehículo prototipo, iniciará los viajes de ensayo en 1997, en una demostración y prueba precomercial de 42,7 kilómetros, en la zona de Yamanashi, cerca de Tokio. Esta guía magnética de doble pista permitirá comprobar el funcionamiento del sistema operativo: trenes grandes que circulen por un túnel a 500 km por hora. Los promotores del proyecto esperan contar con una versión comercial entre Tokio y Osaka para antes del 2005.

En Alemania, la Magnetbahn GmbH ha venido investigando, desde finales de los años sesenta, en el sistema de trenes de deslizamiento electromagnético de atracción "Transrapid". Los vehículos de prueba realizaron una demostración en Emsland, a principios de los ochenta. Su guía magnética de 31 kilómetros en forma de ocho permite a coches de gran tonelaje circular en condiciones similares a las reales. Durante casi 5 años se ha examinado el vehículo de preproducción TR-07, que alcanza velocidades de 400 a 450 km por hora. El gobierno alemán aprobó hace poco la técnica para una nueva línea que tiene que unir Berlín y Hamburgo. El trazado, que debe construirse antes del 2005, será el eje central de un programa para intensificar los viajes este-oeste en la reunificada Alemania.

En Estados Unidos la empresa Ford Motor, el Instituto de Investigación de Stanford y el Instituto de Tecnología de Massachusetts abandonaron el desarrollo del tren de deslizamiento magnético tras un breve período de investigación que abarcó desde finales de la década de los sesenta hasta mediados de los setenta. Sin embargo, a finales de los ochenta volvió a retomarse la idea, y, patrocinada por el gobierno, se lanzó la "Iniciativa Nacional Maglev", con la intención de incorporar técnicas procedentes de la industria aerospacial y otras: criogenia, electrónica de energía, aerodinámica, dinámica de control y de vehículo. El objetivo consistía en pergeñar un sistema de tren de deslizamiento magnético de segunda generación a la medida de las necesidades y condiciones de Norteamérica.

En 1994 la asignación presupuestaria se agotó sin haber despertado el interés de la inversión privada. Se diseñaron cuatro sistemas de tren de deslizamiento magnético innovadores. Aunque ninguno pasó de esa fase, el ejercicio teórico generó ideas interesantes, entre ellas algunas relativas a la propulsión sincrónica y una versión superconductora de suspensión electromagnética con un amplio espacio de aire entre vehículo y pista.

Hasta cierto punto, el tren de deslizamiento magnético es víctima de las circunstancias cambiantes. Hace 20 o 25 años, la técnica se consideraba ideal para conectar áreas densamente pobladas distantes entre sí has-



3. INTERIOR del tren de alta velocidad.

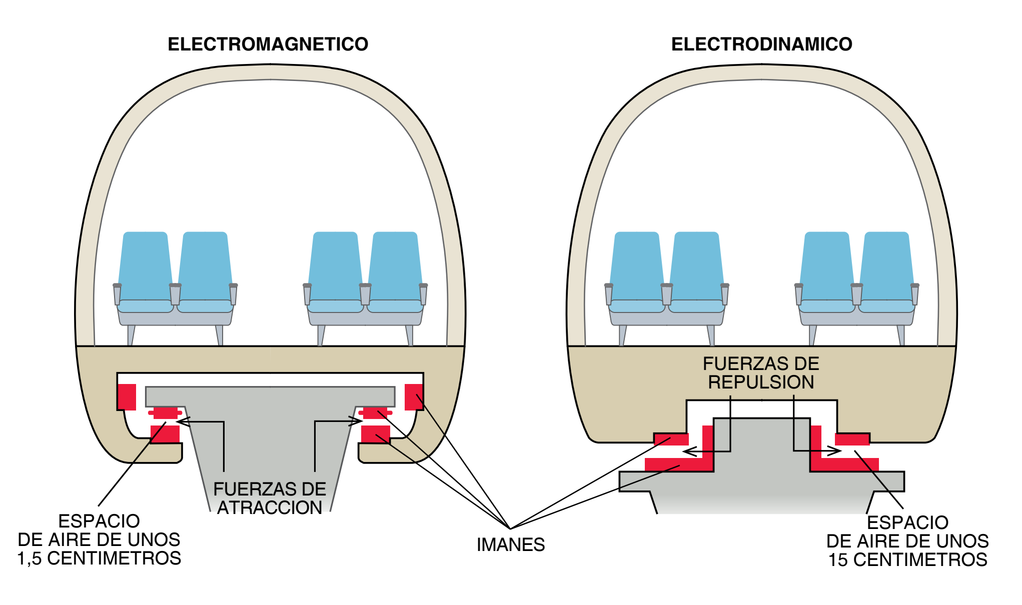
ta 600 kilómetros. Velocidades de 450 a 500 km por hora permitirían al tren de deslizamiento magnético competir con las líneas aéreas, se razonaba en medio de las preocupaciones que suscitaban el coste y disponibilidad de los carburantes derivados del petróleo.

Esta línea de razonamiento depende sobre todo de la velocidad máxima de los ferrocarriles, velocidad muy inferior a la de los trenes de deslizamiento magnético; si por ello no fuera, los ferrocarriles podrían resultar útiles en muchos casos. Veinte o treinta años atrás se creía que la velocidad límite de los ferrocarriles era de unos 250 kilómetros por hora. Como se ha visto, el tren de alta velocidad alcanza 300 kilómetros por hora. Avance logrado gracias al progreso en aerodinámica, dinámica de raíl-rueda y transferencia de altos niveles de energía eléctrica a un tren en movimiento desde un tendido superior. Más impresionante aún: se han hecho experimentos con trenes de ruedas que corren a 520 kilómetros por hora —3 km por hora más rápidos que el récord del tren de deslizamiento magnético. Aunque nadie habla de la posibilidad de un tren de pasajeros a tamaña velocidad, ahora los 350 kilómetros por hora se consideran factibles.

En resumen, el señuelo del tiempo y la velocidad del tren de deslizamiento magnético han perdido fascinación; visto con realismo, sería de un 20 o 30% frente a los mejores sistemas de ferrocarril. Queda ahora por ver cuántos gobiernos hallarán este margen suficientemente convincente para comprometerse en una técnica del transporte novedosa, para trayectos de tipo medio y denso tráfico, que podría competir con las líneas aéreas.

Desde luego, las velocidades altas harían más atractivo al tren de deslizamiento magnético. Además, la velocidad de 500 kilómetros por hora no es, en cualquier caso, el punto final. Pero uno de los principales factores limitantes de esta velocidad reside en la aerodinámica. La energía necesaria para vencer la resistencia aerodinámica aumenta con el cubo de la velocidad; el ruido procedente de las fuentes aerodinámicas, con la sexta potencia. Y las perturbaciones causadas por trenes que se adelantan o que entran y salen de los túneles resultan cada vez más graves a velocidades altas. Factores que han obligado a pensar en la posibilidad de que los trenes de deslizamiento magnético circulen por un túnel total o parcialmente vacío.

Hace años sugería un estudio que un túnel de este tipo podría unir Nueva York con Los Angeles, quizá ciudades de distintos países y, a través de enlaces transoceánicos, de distintos continentes. La velocidad límite podría alcanzar los 2000 kilómetros por hora, y un perfil de bajada y subida permitiría entre estaciones la participación de la gravedad en la propulsión y el frenado. Otras consideraciones ingenieriles, como el coste de la realización y mantenimiento del túnel, convierten la idea en un sueño, como mínimo.



Tal vez tardemos muchos años en que, en dos horas, nos plantemos de Nueva York en Los Angeles. Mientras tanto, aguardan importantes hitos para los trenes de deslizamiento magnético y para los ferrocarriles. De aquí a diez años asistiremos a la inauguración de las primeras rutas comerciales de deslizamiento magnético de cierta distancia. El tren de alta velocidad mejorará su velocidad, el confort y la comodidad de sus pasajeros. Los servicios europeos incrementarán las líneas de su red. Al mismo tiempo, se construirán muchas más líneas en Asia, incluida la terminación de una red nacional en Japón y nuevas líneas en Corea, Taiwan y China.

Norteamérica no va a la cabeza de las nuevas técnicas del tren de alta velocidad. Pero el país necesitará rejuvenecer las rutas de sus pasajeros, empezando por el enlace nordeste. Probablemente se necesitarán algunas motivaciones adicionales, como otra crisis del petróleo o tal congestión del tráfico aéreo y rodado que impida el crecimiento económico. Las videoconferencias y otras formas de telecomunicación atemperarán la urgencia de viajar y ahorrarán tiempo y dinero. Sin embargo, todavía no percibimos que esas innovaciones frenen el crecimiento de los viajes de negocios o trabajo. Las telecomunicaciones pueden ser lo próximo bueno, pero lo mejor será estar presente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUPERTRAINS: SOLUTIONS TO AMERICA'S TRANSPORTATION GRIDLOCK. Joseph Vranich. St. Martin's Press, 1993.

THE 21ST CENTURY LIMITED: CELEBRATING A DECADE OF PROGRESS. High Speed Rail/Maglev Association, Alexandria, Va. Reichman Frankle, Englewood Cliffs, N. J., 1994.

HIGH-SPEED GROUND TRANSPORTATION IS COMING TO AMERICA—SLOWLY. J. A. Harrison en *Journal of Transportation Engineering*, volumen 121, n.º 2, páginas 117-123; marzo-abril 1995.

HIGH-SPEED GROUND TRANSPORTATION DEVELOPMENT OUTSIDE THE UNITED STATES. Tony R. Eastham en *Journal of Transportation Engineering*, vol. 121, n.º 5, páginas 411-416; septiembre-octubre 1995.

El automóvil: limpio y a medida

Dotados de inteligencia, los autómoviles se ajustarán a sus conductores y les ayudarán a evitar las aglomeraciones del tráfico

Dieter Zetsche

Hace ya décadas, cuando los vehículos a motor comenzaban a hacerse omnipresentes en muchos países, la imagen del conductor por una carretera solitaria o un parque iluminado por la luna plasmaba la esencia del progreso y la autonomía. Había una buena razón: en los países desarrollados, el automóvil empezaba a dilatar los horizontes de la gente, ensanchando el área donde podía vivir, trabajar y descansar.

Pero como muy bien sabe quien ha tenido que soportar una larga y cansina retención, los coches se ven inmersos en un enorme y complejo sistema, a veces impredecible. Por sus arterias fluyen ríos de vehículos que conducen personas con destreza y talante muy dispar. El número creciente de vehículos satura ya ese sistema en muchas áreas urbanas; en no pocas, además, agrava su nivel de contaminación. Entre accidentes, carburante desperdiciado y contaminación, el mundo se gasta billones de pesetas al año.

Una cifra de importancia suficiente para impulsar a los fabricantes a dar un paso inimaginable tiempo atrás: unir sus esfuerzos a los de múltiples empresas de otros sectores técnicos e institutos de investigación para trazar los derroteros del transporte de las próximas décadas. Estos programas, acometidos por separado en Europa y los Estados Unidos, abordaron las cuestiones económicas, ambientales y de seguridad implicadas; y lo más destacable: se fijaron en el tráfico como un todo integrado. El cambio de perspectiva presagia un giro fundamental en el desarrollo del sistema de transporte de automoción y, posiblemente, su mayor metamorfosis desde que arrancó, hace más de un siglo.

Los automóviles podrán ver, oír y comunicarse entre sí y con la calzada. Percibirán el estado en que se encuentre el conductor, y le avisarán en caso de fatiga, distracción o exceso de velocidad. De forma gradual, irán tomando el control de la marcha, ahora en manos del hombre. En un futuro más lejano, podrían conducir solos en carreteras bien señalizadas y en ciertas situaciones, por ejemplo siguiendo a otros coches. Aunque mayoritariamente continuarán propulsados por motores de combustión interna, aparecerán modelos de excelente rendimiento, al tiempo que se irán incorporando prototipos eléctricos e híbridos.

El trabajo teórico subyacente bajo los grandes trazos que acabo de dar se llevó a cabo en Europa entre 1986 y 1994, en el marco del programa Prometheus, consagrado al diseño de un tráfico seguro y eficiente en el continente. Participaron en el proyecto 13 empresas automovilísticas, unas 50 distribuidoras y compañías electrónicas y un número equivalente de institutos politécnicos. También en los Estados Unidos y en Japón existen proyectos similares; el nipón se concentra en la transmisión de información viaria en las intersecciones.

Ingenieros y científicos del Prometheus se dividieron el trabajo en tres campos de investigación: gestión del tráfico, conducción asistida y seguridad. Aunque no está desarrollada todavía la técnica pertinente a estas dos últimas, sí se han experimentado con éxito los proyectos piloto de la infraestructura del sistema de gestión del tráfico. Piedra angular de ésta será la conducción asistida mediante ordenadores incorporados que recibirán la información viaria retransmitida.

El conductor introduce su punto de destino en el ordenador de circulación viaria del vehículo. El ordenador escoge la ruta más rápida de acuerdo con las condiciones de tráfico y guía



1. EL AUTOMOVIL SIN CONDUCTOR es el objetivo de VITA, un proyecto de investigación alemán. Las cámaras de vídeo registran la posición del coche en su carril, los semáforos, los obstáculos y otros vehículos. El ordenador que lleva incorporado reacciona frenando, corrigiendo la dirección o acelerando. En la primera fase se utilizó un camión ligero; en la segunda, un sedán. La técnica experimental ha cubierto 5000 km con vehículos que corrían por autopista a 150 km por hora.

al conductor con instrucciones verbales del sistema de sonido del vehículo y mediante la pantalla instalada sobre el salpicadero. Operan ya distintos prototipos en Estados Unidos, Japón y Europa.

La versión europea se denomina "guía viaria dual". Actualizará continuamente la información viaria, la codificará y se transmitirá a través de un canal especial de mensajes de tráfico del Sistema de Datos de Radio Europa. El sistema irá más lejos: si la emisora de los mensajes notifica que todas las rutas que llevan a un destino están congestionadas y existe un transporte público alternativo, el ordenador de circulación nos aconsejará esa posibilidad (en cuanto esta parte del sistema esté disponible). Varios fabricantes ofrecen ya este ordenador de circulación viaria en sus modelos de lujo.

Con la mayoría de los demás sistemas desarrollados en Prometheus, el ordenador de circulación puede considerarse una pieza del automóvil sin conductor. Esta aplicación, distante quizá varios decenios, podría comenzar a ensayarse en aeropuertos y fábricas para encauzar las mercancías por rutas y en condiciones previsibles. VITA II, una colaboración entre Daimler-Benz y varias universidades alemanas, acaba de conseguir buenos resultados en esta línea. Se equipó un sedán Mercedes-Benz con 18 cámaras de vídeo, que enfocaban el entorno del vehículo. Se registraron la posición del coche en su carril, las señales indicadoras, los obstáculos y movimiento del tráfico; se descifraron los datos y un ordenador procesó la información para conducir al coche en una autopista real. Durante el proyecto VITA II y su antecesor, VITA I, se recorrieron 5000 kilómetros en carreras de pruebas, la mayoría en autopistas alemanas, a velocidades de hasta 150 km por hora. Los fabricantes trabajan ahora en la posibilidad de comercializar ese avance.

DIETER ZETSCHE es miembro de la Junta Directiva de Mercedes-Benz AG.

De aquí hasta que se materialicen tales posibilidades, la gente seguirá al frente del volante muchos años. Continuarán los accidentes, las retenciones y las inclemencias del tiempo. De acuerdo con Prometheus, la clave para reducir estos peligros son el intercambio de información y la cooperación entre vehículos; dicho en breve, la conducción asistida.

El núcleo de esa estrategia lo constituye una oficina central de información viaria, que reunirá la información enviada por los centros de dirección del tráfico regionales y la transmitirá a los automóviles a través de faros de rayos microondas o infrarrojos instalados en los arcenes de las calzadas. La oficina





2. EL TURISMO del futuro saluda en homenaje a sus predecesores con reposacabezas estilo años 50. Este modelo de coche Mercedes Benz posee un techo duro y una luna trasera que se repliegan apretando un botón.

central aportará a los conductores un conocimiento del tráfico y de las condiciones de las carreteras muy superior a lo que su vista alcanza. En caso de accidente, los vehículos implicados se localizan automáticamente, y se inician las medidas de rescate a través de teléfonos móviles especiales. Para evitar el choque en cadena, la llamada de emergencia avisará a los vehículos del peligro cercano. De entrada, la oficina central podría adelantarse al accidente reprendiendo electrónicamente a los conductores que rebasaran el límite de velocidad permitido. No es ciencia ficción. La técnica implicada en estos procesos se sometió a prueba durante el programa Prometheus. Se está a la espera de su materialización.

Se hará la conducción más segura, sobre todo para quienes se distraen fácilmente, con un nuevo tipo de control de crucero, mucho más experto y autónomo. Al accionar los pedales del freno y del gas, ajustará la distancia entre un vehículo y el que esté delante “al vuelo” gracias a una combinación de velocidad y condiciones de la carretera. Incorporado en el extremo frontal del vehículo, el sistema utilizará radar o rayos infrarrojos para medir la distancia hasta el coche precedente, sin que precise la ayuda de equipos o sistemas especiales instalados en la calzada.

Además de estas innovaciones relativas al tráfico, Prometheus se ocupó de la seguridad de la conducción con mejoras en los mismos vehículos. Se refieren a la visibilidad nocturna y en malas condiciones meteorológicas. Algunos fabricantes ya están probando faros que emiten radiación ultravioleta; amén de reducir su brillo, los rayos se reflejarían mejor en la vestimenta de los peatones, las líneas de los carriles, etc. No tardarán mucho en aparecer coches de acabado superior que poseerán sistemas de visión por infrarojos y faros que, al pulsar un botón y a través de un sensor, iluminarán el espacio frontal del coche sin deslumbrar a los otros conductores.

La imagen podrá percibirse con total claridad, posiblemente con un sistema de alerta, que proyecta la escena de manera que el conductor la ve como si flotara a cierta distancia por delante del coche. Opcionalmente, el sistema podría incorporar un mecanismo de control de distancia que recomienda —o incluso impone— una velocidad adecuada tras analizar el campo de visión del conductor.

Una visión más nítida de la carretera puede reducir pero no eliminar las situaciones de riesgo; los sensores, los sistemas expertos y las estrategias de control tienen la función de ayudar a los conductores a maniobrar o detenerse de repente. Podemos evitar un giro brusco frenando cada rueda por separado, frenando más con las que más se desvían. Varios fabricantes están experimentando con sistemas de radar que avisarían ante una inminente colisión y posiblemente incluso accionarían los frenos. Con el tiempo, resultará factible mantener automáticamente el coche en un carril en condiciones normales de conducción.

El coche del futuro controlará el entorno sin olvidar al conductor que lleva dentro. Las principales causas de accidente son el cansancio y la pérdida de concentración, especialmente en viajes largos. Pero los conductores cansados se dejan llevar, el tiempo necesario para reaccionar aumenta, la atención decae, los párpados empiezan a cerrarse y la resistencia eléctrica de la piel disminuye. Detectados estos síntomas, una alarma audible avisa al conductor de que ha llegado el momento de descansar.

Si de algo están seguros los fabricantes es de que la seguridad de los pasajeros es necesaria, pero no suficiente; los coches tendrán que adecuarse mejor al medio ambiente. Todo el mundo está, pues, empeñado en idear vehículos menos contaminantes. Se han estado realizando pruebas con prototipos experimentales, algunas alentadoras y de notable interés por parte del público. Pese a ello, y durante los próximos decenios, los coches continuarán propulsados por motores de combustión interna, aunque menos contaminantes y de mayor rendimiento.

No se necesita mucha imaginación para prever un mercado de vehículos avanzados, ecológicos y eficientes. Estos coches habrán de multiplicar por dos el ahorro de combustible: consumirían un litro de gasolina cada 25 km en condiciones de conducción mixta (urbana y por autopista, según un test

alemán estándar llamado DIN). A ello contribuirán los avanzados sistemas de gestión electrónica de transmisión mecánica, de elevada sensibilidad y eficaz interacción entre motor y carga.

El coche no contaminante ideal es el eléctrico, sin más efectos negativos sobre el medio ambiente que los derivados de la generación de electricidad para cargar las baterías y su desecho. En sus baterías inadecuadas estriba el auténtico obstáculo para generalizar su uso. A los fabricantes se les hurta todavía una combinación aceptable de densidades de energía y fuerza, coste y duración; habrá, pues, que seguir confinando durante algunos años los vehículos eléctricos a espacios limitados.

El coche híbrido eléctrico consta de un motor eléctrico alimentado por batería y un pequeño motor de combustión. Se utilizan por separado o a la vez según las condiciones de la marcha. En ciertas modalidades, el motor pequeño funciona siempre, con buen rendimiento y contaminando poco, cargando las baterías y potenciando las prestaciones del vehículo. Esta ventaja ha renovado el interés por los híbridos. Los fabricantes han desarrollado modelos no contaminantes o de baja contaminación, que empezarían a andar en algunas regiones dentro de cinco o seis años.

Podemos recortar las emisiones de forma importante mediante carburantes más limpios. Si hablamos de hidrocarburos, contaminan menos el metanol y el gas natural licuado o comprimido que la gasolina; se les ha empleado en motores experimentales que han conseguido un rendimiento comparable con el obtenido por motores tradicionales de combustión interna. El carburante menos contaminante sería el hidrógeno, cuyo único subproducto importante de la combustión es el vapor. Derivado del agua, el hidrógeno es abundante y versátil: puede quemarse en un motor de combustión o transformarse en electricidad silenciosamente en una pila electroquímica, que a su vez podría alimentar un motor eléctrico.

Aunque ambos enfoques parecen prometedores, los problemas de suministro son los más difíciles de sortear. No se pueden producir las cantidades necesarias de hidrógeno de una forma aceptable desde el punto de vista ecológico y económico. En Alemania un litro de gasolina cuesta aproximadamente la mitad de lo que vale una cantidad de hidrógeno líquido de similar contenido energético. Por no hablar de la ingente inversión necesaria para que crear una red de distribución de hidrógeno líquido que se pareciera a las redes actuales de gasolineras.

Dejando aparte el suministro energético, los automóviles se armonizarán y se adecuarán a sus propietarios dentro de veinte o treinta años. La fabricación puntera y las técnicas de automoción eléctrica posibilitarán una nueva generación de automóviles que pueden adaptarse no sólo para responder a diferentes funciones y necesidades, sino también a conductores de muy diverso talante.

Hay ya un fabricante empeñado en construir vehículos cuyos elementos se escogerían de entre docenas o incluso



3. A PUNTO DE CHOCAR. Esta familia de maniquíes se utiliza para grabar lo que les ocurre a los conductores en un accidente de colisión. Los maniquíes, que pasaron las pruebas en el centro de seguridad de Volkswagen en Wolfsburg, Alemania, valen unos siete millones de pesetas cada uno.



4. EL HUMO pone de relieve el volumen de aire desplazado por el cupé, perfilándolo. Un mayor rendimiento del combustible requiere mejoras en la aerodinámica, así como en el motor y el eje de transmisión.



5. EL CONTROL DE LAS EMISIONES continuará desempeñando un papel importante porque los vehículos de emisión cero tardarán bastante en llegar al mercado. Así, los avances que se realicen para reducir la contaminación de los automóviles dependerán de que se fabriquen coches de gasolina limpios.

cientos de módulos, prefigurando una más amplia variedad de automóviles de los que acostumbramos a ver ahora en nuestras carreteras. Estos bloques modulares podrían montarse a gusto del consumidor, en el momento de la compra o en cualquier otro de la vida útil del automóvil. Durante un fin de semana caluroso o durante unas vacaciones, por ejemplo, el marco funcional del vehículo podría convertirse en un descapotable deportivo o en una furgoneta capaz de cargar equipo de ocio. No hablamos sólo del chasis. Un vehículo eléctrico podría disponer de un módulo de carga del motor, de rápida instalación, que convertiría el coche en un híbrido con mayores posibilidades.

La personalización podría llevarse a niveles superiores con el advenimiento de la técnica de sustentación electrónica, que se estandarizó en la navegación de los reactores. Con dicha técnica, todos los cables y conexiones mecánicas que unen, por ejemplo, el volante, los pedales y el cambio de marchas al eje, el acelerador y la transmisión quedarían substituidos por la electrónica, incluidos los sistemas de control. El tránsito hacia esta técnica constituirá una revolución invisible, que no requerirá nuevos conocimientos por parte del conductor.

Por el contrario, la técnica se adaptará a las exigencias y destreza del conductor, creando espacio para su creatividad. Permitirá estabilizar un vehículo en diferentes configuraciones (descapotable o furgoneta de carga) y para cada temperamento: el entusiasta recibiría la respuesta de un coche deportivo, mientras otro más pacífico circulará con mayor sosiego.

Decididamente, el desarrollo de la automoción no se ha frenado. En realidad, diríase que acaba de arrancar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AUTOMOBILE TECHNOLOGY OF THE FUTURE. Ulrich Seiffert y Peter Walzer. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1991.

ALTERNATIVE CARS IN THE 21ST CENTURY: A NEW PERSONAL TRANSPORTATION PARADIGM. Robert Q. Riley. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1994.

HACIA UN MAYOR RENDIMIENTO DEL AUTOMÓVIL, John DeCicco y Marc Ross en *Investigación y Ciencia*, febrero de 1995.

RIDERS ON THE STORM. Uli Deker en *Daimler-Benz High Tech Report*, págs. 14-19, marzo 1995. (Disponible en Daimler-Benz-Leserservice, Postfach 1271, D-73762, Neuhausen, Alemania.)

Evolución del avión de línea

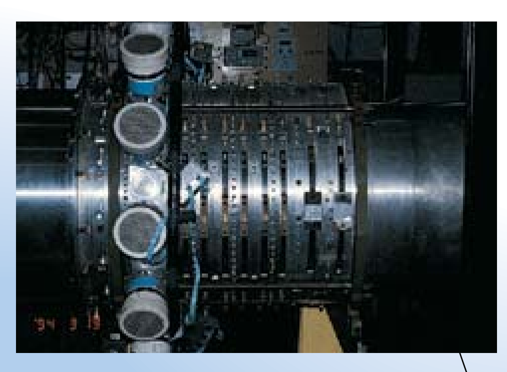
Los avances en materiales, motores de reacción y presentaciones en cabina podrían traducirse en vuelos más baratos y seguros

Eugene E. Covert

Pocos esperaban los drásticos cambios en los hábitos viajeros que surgieron cuando el avión de transporte propulsado por reactores se introdujo en el servicio comercial de pasajeros al final de los años cincuenta. Virtualmente libre de vibraciones, este nuevo avión era más silencioso y cómodo que los propulsados por hélice que le precedieron. Incluso era más impresionante su capacidad para los vuelos transoceánicos sin escalas muy por encima de la mayoría de las tormentas. Viajes tranquilos, en menos tiempo y con tarifas más baratas condujeron a un mundo más accesible para los viajeros por negocios y por placer, así como para el transporte de mercancías.

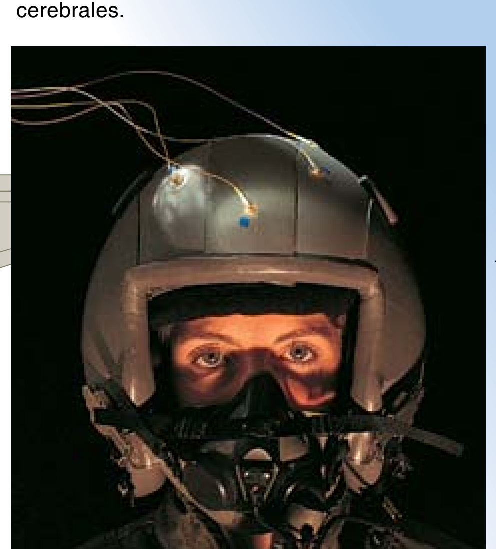
El futuro avión de pasajeros puede presentar cambios igualmente drásticos. Con la llegada de las herramientas de diseño asistido por ordenador, los aviones mostrarán configuraciones inusuales que ofrecerán mejores prestaciones y transportarán más pasajeros. La industria ya ha estudiado aviones comerciales con forma de ala volante. Un fuselaje corto con forma de colilla alojaría la cabina y sobresaldría del ala consistente. Pero la mayoría de los pasajeros, hasta 800, se acomodarían dentro del ala en una suerte de sala de cine.

Otros diseños abogan por una apariencia novedosa. Un avión futurista estaría configurado por varios fuselajes interconectados por las alas y una serie de montantes. Se estudia, además, la viabilidad de un avión supersónico sucesor del Concorde.



Motores “inteligentes” equipados con sensores y actuadores ajustarán su flujo de aire para mejorar la eficiencia y longevidad del sistema propulsivo.

Llegará el día en que los pilotos reaccionen ante acontecimientos imprevistos controlando las presentaciones en cabina con ondas cerebrales. La Base Aérea Wright-Patterson ha efectuado investigaciones para controlar un simulador de vuelo mediante ondas cerebrales.

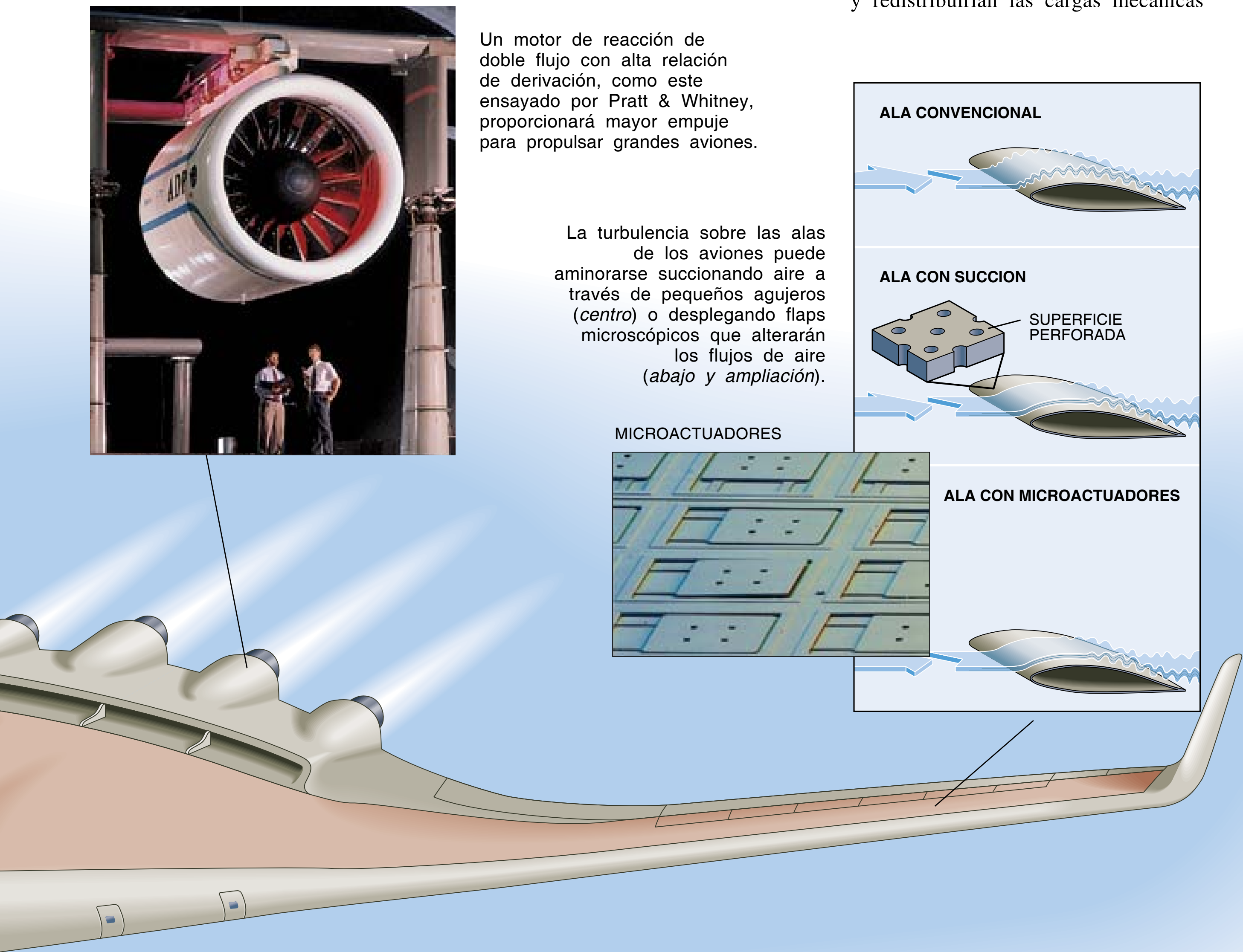




Una cabina parecida a una sala de cine podría acomodar de 600 a 800 pasajeros.

La decisión de lanzarse en cualquiera de estos proyectos puede depender de la capacidad del fabricante para efectuar una inversión de miles de millones de dólares en un entorno de alta incertidumbre económica. Los riesgos podrían ser demasiado altos en este momento. Boeing y algunos miembros del consorcio Airbus han publicado recientemente los resultados de un estudio conjunto que muestra la falta de mercado para un gigantesco avión que transporte de 600 a 800 pasajeros. Aviones tan grandes plantean desafíos no sólo a la ingeniería aerospacial, sino también a los operadores en los aeropuertos: el incremento de la envergadura alar requeriría más espacio entre las puertas de embarque de pasajeros.

Aun cuando ninguno de estos proyectos viera la luz, los progresos técnicos permitirán que la próxima generación de aviones economice gastos y generarán nuevos estándares de seguridad y rendimiento operativo. En un futuro inmediato, la construcción de aviones con mejores materiales y sistemas propulsivos continuará mejorando sus actuaciones. A más largo plazo, sensores y actuadores microscópicos, así como ordenadores repartidos por todo el avión, conducirán a una revolución silenciosa en los métodos con los que los ingenieros resuelven sus problemas; un avión “inteligente” les otorgará el control sobre muchos fenómenos que han comprendido desde hace tiempo pero sobre los que no podían intervenir. Los mecanismos de realimentación y control de minúsculos sensores y de superficies móviles, llamados actuadores, reducirían la resistencia aerodinámica y redistribuirían las cargas mecánicas



Un motor de reacción de doble flujo con alta relación de derivación, como este ensayado por Pratt & Whitney, proporcionará mayor empuje para propulsar grandes aviones.

La turbulencia sobre las alas de los aviones puede aminorarse succionando aire a través de pequeños agujeros (*centro*) o desplegando flaps microscópicos que alterarán los flujos de aire (*abajo y ampliación*).

1. ALA VOLANTE, proyecto ingenieril sugerido para un avión comercial gigante de 600 a 800 pasajeros, acomodados en varias cabinas. Aparte de adquirir configuraciones novedosas, los aviones del futuro incorporarán técnicas que irán desde motores avanzados hasta controles en cabina manipulados por ondas cerebrales.

con el fin de incrementar la vida de una estructura alar.

Gracias a la información recibida de redes de sensores, se alargarán los intervalos entre mantenimientos y los mecánicos descubrirán pronto la fuente de un problema. Otros sensores, acoplados con información procedente de satélites, permitirán a la tripulación un mejor conocimiento de la posición de los aviones cercanos, lo que reforzará la seguridad.

El avión inteligente puede tardar décadas en llegar. Pero las compañías aéreas no cesan en su presión a los fabricantes para reducir los costes de operación de una máquina de varios millones de dólares. Los programas de diseño por ordenador, mediante el cual los ingenieros observan el acoplamiento entre partes y sistemas, ayudarán a alcanzar este objetivo. Grandes bases de datos de componentes de aviones determinarán qué partes son más fiables y cuáles ofrecerían un coste de operación menor. En los próximos diez años también los diseñadores estructurales investigarán en materiales para reducir el peso del fuselaje y las alas. Un material prometedor es una aleación de aluminio-litio. Tiene una densidad más baja y una resistencia más alta que otras aleaciones de aluminio, razón por la que Airbus Industrie la ha incorporado en las secciones delanteras de las alas del Airbus A330 y A340.

Para un uso más general de las aleaciones de aluminio-litio habrá que esperar la creación de un material que soporte mejor la fractura. Alcoa está desarrollando un metal de aluminio-litio que mejorará, en más de un tercio, la resistencia a la fractura con relación a las aleaciones de aluminio existentes. Se habla de que el material podría ahorrar alrededor del 12 por ciento de peso de la cola de los grandes aviones. Una alternativa atractiva son los materiales compuestos en los que fibras de grafito se colocan en una matriz de polímeros orgánicos, confiriendo al material mayor resistencia por unidad de peso. El ingeniero podría manejar los materiales y repartir la diferentes cargas soportadas por la estructura variando el número de capas de fibras y la dirección en la que éstas se colocan.

Aviones militares y civiles han incorporado ya algunos materiales compuestos en estructuras que soportan cargas débiles. El coste de los materiales —y el desconocimiento de sus mecanismos de fallo— ha retrasado su aplicación en los aviones comerciales. Pero se trata de obstáculos que también se van superando. Los materiales compuestos constituyen hasta el 9 por ciento del peso estructural de un Boeing 777, que entró en servicio en junio, alrededor del triple que en los aviones 757 y 767.



2. UN MATERIAL COMPUESTO PARA AVIACION, fabricado en una cámara de plasma de una planta propiedad de Textron Specialty Materials en Lowell, Massachusetts. El operario extrae una lámina casi acabada que se ha formado rociando titanio sobre una base de fibras de carburo de silicio.

EUGENE E. COVERT ocupa la cátedra T. Wilson de aeronáutica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, cuyo centro de estudios aerodinámicos dirige.

De la mayoría de los materiales compuestos se dice que son “termoformados”, porque maduran en un horno caliente bajo presión. No pueden recalentarse ni modificárseles la forma. Inconveniente del que están exentos los polímeros “termoplásticos”, que pueden reconfigurarse para eliminar algún defecto introducido en su fabricación.

La longevidad del aluminio y de los materiales compuestos se reforzaría si se les insertaran minúsculos sensores para medir los niveles locales de tensión. Estimada así la vida remanente de la estructura, tal información proporcionaría además una realimentación para deflectar las superficies móviles de control del vuelo —flaps o alerones— con el fin de reducir las solicitaciones mecánicas.

Los materiales compuestos hechos de metal y cerámica mejorarían las actuaciones de los motores. Un motor fabricado con fibras de carburo de silicio embebidas en una matriz de titanio podría operar a temperaturas más altas y así producir el mismo empuje con menos combustible. El motor, más ligero, gozaría también de vida más larga.

Se han ideado otros medios para multiplicar el rendimiento. En nuestros motores de reacción, el aire es capturado por un ventilador (“fan” en la jerga aeronáutica), presurizado, mezclado con combustible y quemado antes que los gases calientes fluyan hacia la salida. La eficiencia de este sistema de propulsión, su capacidad para convertir calor en empuje quemando la mezcla caliente de combustible y aire, aumenta si parte del aire que penetra en el motor atraviesa un conducto que bordea el “núcleo” del mismo donde se queman los gases calientes. Este motor de doble flujo con alta relación de derivación, así se le llama, genera menos ruido.

En los modernos turborreactores los conductos de derivación trabajan con seis o siete veces la cantidad de aire que atraviesa el núcleo. Algunos motores experimentales han multiplicado por 20 el aire de la derivación respec-

to del que pasa por el núcleo. Sin embargo, estos motores de doble flujo con relación de derivación altísima tendrán algún inconveniente: incrementarán el tamaño y el peso del "fan" y de otros componentes del motor, además de aumentar la resistencia.

La eficiencia de un turborreactor depende también de la forma de los álabes giratorios del compresor, donde el aire es presurizado, y de la turbina que suministra potencia al compresor. El laboratorio de turbinas de gas del Instituto de Tecnología de Massachusetts está desarrollando un motor inteligente lleno de sensores y actuadores que alterarán la forma de los álabes en vuelo para mejorar las actuaciones.

Un motor más eficiente unido a una disminución en la resistencia ahorraría costes en la operación. Una de las fuentes de resistencia, la resultante del paso del aire alrededor de las alas, presenta un problema arduo. Los aerodinámicos estudian el comportamiento de la capa límite, conjunto de finos estratos de aire que se forman en la superficie de un avión. En una capa límite laminar, el flujo de aire permanece tranquilo; las capas de aire se estratifican a la manera de naipes en un mazo, deslizando sutilmente una sobre otra. Pero en los grandes aviones de pasajeros esas corrientes regulares se transforman en torbellinos turbulentos, induciendo incrementos sustanciales de resistencia.



3. EL DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR, utilizado por Boeing para construir un modelo digital de su nuevo avión, el 777, se perfeccionará con los años para que incluya información sobre coste y fiabilidad de componentes.

Experimentos efectuados por la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA) con un Boeing 757 modificado han mostrado que la resistencia puede aliviarse mediante la absorción de la turbulencia. Se cubre una porción de ala con minúsculos agujeros conectados a una bomba de succión. La acción de la bomba introduce aire en los agujeros, suavizando así el flujo en la capa límite. La cantidad de turbulencia pueden detectarla diminutos sensores sobre el ala, que indican la cantidad de succión necesaria. Algunas medidas podrían reducir la turbulencia mediante pequeños actuadores; por ejemplo, con miles de microscópicos flaps móviles montados sobre el ala que se levantan desde la superficie base cuando el flujo de aire se vuelve turbulento

El trabajo de los pilotos se beneficiaría si dispusieran de herramientas que les proporcionasen un conocimiento cabal de dónde están y a dónde van. El "conocimiento de situación" nos remite a su capacidad para integrar las lecturas de velocidad, altitud, posición, meteorología, dirección del vuelo y presencia de aeronaves circundantes. Corresponde al ingeniero idear la mejor forma de presentar la información a la tripulación. La mayor parte del tiempo, el piloto sólo necesita comprobar que las agujas de los instrumentos apuntan en la dirección correcta. Pero en una emergencia debe valorar rápidamente el peligro y determinar procedimientos alternativos.

La instrumentación de los aviones ofrece un enorme flujo de datos —demasiados para que el piloto los asimile en los escasos segundos críticos disponibles. Se requieren una programación y unos procesadores que presenten en el monitor sólo los datos pertinentes de la situación. Antes de que tales sistemas puedan programarse, hay que crear una nueva disciplina —una ingeniería cognoscitiva— que combine estudios de cómo las personas captan la información y cómo tales percepciones están relacionadas con procesos cerebrales.

La ingeniería cognoscitiva podría demostrar mayor eficacia en conjunción con avanzadas presentaciones en el monitor, que proyecten la información crucial sobre un visor montado en el casco del piloto. Algún día los pilotos podrán responder a los datos de una pantalla con la misma celeridad con que trabaja su mente. De momento se está avanzando en la investigación del empleo de ondas cerebrales para cambiar la posición de un cursor o para manipular otros controles de cabina.

El avión del año 2050 podría o no parecerse a los actuales. Pero el progreso de la ingeniería aeronáutica y del conocimiento de los procesos cognoscitivos de los pilotos hará el transporte aéreo más seguro y accesible para un número creciente de viajeros.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UNDERSTANDING AIRCRAFT STRUCTURES. John Cutler. Granada Publishing, 1981.

FUNDAMENTALS OF FLIGHT. Richard Shevel. Prentice Hall, 1989.

AERONAUTICAL TECHNOLOGIES FOR THE TWENTY-FIRST CENTURY. Consejo de Ingeniería Aeronáutica y Espacial y Consejo de Investigación Nacional. National Academic Press, 1992.

AERODYNAMICS, AERONAUTICS AND FLIGHT MECHANICS. Barnes McCormick. John Wiley and Sons, 1995.

Vehículos espaciales del siglo XXI

FREEMAN J. DYSON ha ocupado desde 1953 la plaza de profesor de física del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

Una flota de vehículos espaciales baratos y miniaturizados podría sacar del estancamiento en que se encuentra la era espacial

Freeman J. Dyson

A la hora de abordar el futuro de las actividades espaciales importa empezar por contestar la pregunta "¿Dónde estaba el error?". La era espacial, que comenzó con un toque de trompetas hace unos 40 años, se suponía que iba a conducir a la humanidad hacia un futuro glorioso de expansión cósmica. Pero se transformó, lo mismo que la era de la energía nuclear, en un símbolo de expectativas desmesuradas y promesas fallidas. Vivimos ahora en la era de la información, cuyas técnicas transformadoras de nuestra vida no son los cohetes ni la astronáutica, sino los microprocesadores y los algoritmos de programación. Las actividades espaciales han pasado a un segundo lugar, de apuntalamiento de las comunicaciones vía satélite que sirven de alternativa a los canales en tierra de fibras ópticas. La era espacial se desvaneció porque los grandes sueños se encarecieron sin mesura. La técnica espacial volverá a florecer cuando se le halle aplicación, no cuando se persiga como un fin en sí misma.

Uno de esos objetivos prácticos es la investigación científica. Aquí también se han confundido fines y medios. Algunos proyectos de ciencias espaciales se abultaron tanto que la política y la burocracia le arrebataron las riendas a la ciencia. Misiones a gran escala, como los sobrevuelos de los planetas exteriores por los *Voyager* y las observaciones de galaxias distantes por el *Telescopio Espacial Hubble*, han cosechado abundantísima información y han traído la gloria política a sus patrocinadores. Sin embargo, dentro y fuera de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA) soplan vientos de cambio. Nadie plantea ya misiones de miles de millones de dólares. En el futuro, la financiación resultará más problemática. Las mejores oportunidades de vuelos se desplazarán hacia proyectos menos ambiciosos y baratos.

El Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de Pasadena, que construyó y operó las sondas espaciales *Voyager*, es la institución más independiente e imaginativa de la NASA. Ha trabajado en dos misiones planetarias innovadoras: el *Sobrevuelo Rápido de Plutón* y el *Expreso Kuiper*. El *Sobrevuelo Rápido de Plutón* completaría la exploración *Voyager* del sistema solar exterior tomando películas de alta resolución en muchas longitudes de onda de Plutón y su gran luna Caronte. De forma similar el *Expreso Kuiper* exploraría el Cinturón de Kuiper, un enjambre de pequeños objetos que orbitan más allá de Neptuno y cuya existencia fue predicha por Gerard P. Kuiper hace unos 40 años.

Los proyectos de ambas misiones se basan en una compactación radical de los instrumentos embarcados en las sondas *Voyager*. El equipo instrumental de a bordo pesa cinco kilogramos y realiza las mismas funciones que los instrumentos de los *Voyager*, que pesaban más de 200. Todos sus componentes —ópticos, mecánicos, estructurales y electrónicos— se ha achicado de forma drástica, al par que se les ha dotado de una sensibilidad mucho más refinada.

Daniel S. Goldin, administrador de la NASA, animó al JPL a idear estas misiones para llevar a cabo la exploración del sistema solar exterior utilizando vehículos espaciales más baratos que los *Voyager*. Cada una de las dos misiones *Voyager*, que comenzaron en 1977, costaron mil millones de dólares. Los diseñadores del JPL estimaron que su propuesta del *Sobrevuelo Rápido de Plutón* costaría 500 millones de dólares. Goldin les dijo: "Lo siento, pero eso no es lo que yo tenía en mente."

El *Sobrevuelo Rápido de Plutón* fracasó porque no se apartó bastante del concepto y técnica de los *Voyager*. Todavía incorporaba un pesado generador termoeléctrico, que empleaba como fuente de energía la desintegración radiactiva del plutonio 238. Confiaba en pesados cohetes químicos para alcanzar la velocidad necesaria en el largo viaje hasta Plutón. Era vino nuevo en odre viejo. Los instrumentos científicos se miniaturizaron hasta lo inimaginable, pero el resto del vehículo espacial no se redujo en pareja proporción.

Tras el rechazo del *Sobrevuelo Rápido de Plutón*, los ingenieros se aplicaron a una versión revisada, el *Expreso de Plutón*, que compacta el vehículo espacial completo, pero todavía utiliza cohetes químicos y suministro de energía por plutonio. Es un vino nuevo en un odre seminuevo. El coste se cifra en unos 300 millones de dólares para

1. EL VEHICULO ESPACIAL *EXPRESO KUIPER* representa un corte brusco en la técnica espacial. En vez de cohetes químicos voluminosos, un ligero motor iónico propulsa al vehículo; los iones emergentes emiten luz azul. La energía para el motor proviene de dos paneles solares enormes y ligeros. Un equipo instrumental compactado mejora las actuaciones del vehículo espacial sin sacrificar capacidad científica. El *Expreso Kuiper* examinaría los inexplorados cuerpos parecidos a los cometas que orbitan más allá de Neptuno. En esta interpretación artística del anteproyecto, asoma uno de esos objetos por delante, mientras el huidizo creciente de Neptuno (mostrado con tamaño exagerado) se refleja en el vehículo espacial.

dos vehículos espaciales lanzados independientemente. Se confía mandarlos al espacio hacia el 2003.

Mientras tanto, el *Expreso Kuiper* arranca donde el *Expreso de Plutón* paró. El *Expreso Kuiper* es un vino nuevo en odre nuevo. Se trata de la primera sonda planetaria enteramente nueva desde las misiones *Pioneer* iniciadas en los años setenta. El *Expreso Kuiper* prescinde de los cohetes químicos. Su propulsante es xenón, un gas inerte que puede transportarse en forma de líquido supercrítico tan denso como el agua, sin necesidad de refrigeración. El prototipo del motor se halla ahora en la fase de ensayos. Debe funcionar durante 18 meses sin merma en sus prestaciones para que adquiera la categoría de candidato a una misión real.

La fuente de energía para el *Expreso Kuiper* reside en un par de paneles solares, grandes y ligeros. Paneles que se expanden lo suficiente para proporcionar la energía que el funcionamiento de los instrumentos y las comunicaciones con tierra requieren, incluso con la tenue luz solar del cinturón de Kuiper. No se requiere un generador de plutonio. Algunos expertos del JPL rechazan la idea de utilizar energía solar para transmitir señales a tierra desde esas lejanías y dudan de que puedan producirse los ingentes y ligerísimos colectores solares necesarios para el trabajo.





2. INSTRUMENTOS MINIATURIZADOS ayudarán a reducir el tamaño y el coste de los vehículos espaciales. Patricia M. Beauchamp, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, codirectora del proyecto *Expreso Kuiper*, sostiene un ejemplo de paquete reducido de instrumentos que podría utilizarse para tal misión. Los instrumentos de los *Voyager* con técnica de los años setenta, vistos a la derecha, son menos sensibles y pesan 40 veces más.

Sin embargo, los ingenieros del *Expreso Kuiper* decidieron arrojar la última pieza pesada del armazón del *Voyager*, para que el ave pueda volar libre y raudo.

El *Expreso Kuiper* es un proyecto audaz e innovador. Requiere nueva técnica y un estilo fresco de gestión. Puede fracasar, como el *Sobrevuelo Rápido de Plutón*, porque los ingenieros se vean obligados, bajo imperativos políticos, a hacer demasiadas concesiones y confiar demasiado en ideas añejas. Pero la propulsión eléctrico-solar ha abierto la puerta a una nueva generación de vehículos espaciales pequeños y baratos, beneficiándose del progreso de los últimos 30 años en la miniaturización de instrumentos y ordenadores. Si el *Expreso Kuiper* no llega a volar, otra misión más audaz le sucederá.

Los vuelos espaciales cambiarán su faz de aquí a finales del próximo siglo. Con todo, la técnica ha progresado lo suficiente para poder aventurarse en su decurso. Nuestra previsión se equivocará en los detalles, pero sabemos lo bastante de las leyes físicas como para establecer firmes límites acerca de qué podemos y no podemos hacer. Yo creo que el siglo XXI será la edad de la biotecnología y ésta transformará la configuración de los vehículos espaciales con la profundidad con que cambiará los modelos de la vida humana. Describiré aquí sólo los mecanismos físicos cuya forma y actuaciones puedan predecirse con cierta seguridad.

Para los vehículos espaciales del futuro se han propuesto muchos sistemas propulsivos. Cinco ofrecen grandes promesas técnicas: propulsión eléctrico-nuclear, propulsión eléctrico-solar, propulsión por láser, velas solares y aceleradores dinámicos electromagnéticos. Cada uno presenta ventajas particulares para ciertas misiones. Puestos a elegir, le veo más futuro al sistema eléctrico-solar.

La propulsión eléctrico-solar acelera un vehículo espacial por medio de un chorro iónico de bajo empuje. La radiación procedente del Sol que incide sobre las células solares genera electricidad, que ioniza y acelera un gas no reactivo como el xenón. Los iones cargados positivamente se expulsan fuera del motor formando un chorro que impulsa al vehículo hacia adelante. En un motor cohete químico, el combustible proporciona energía e impulso, mientras que en la propulsión eléctrico-solar están separadas las fuentes de energía (luz solar) y de impulso (el chorro de iones). Mi apuesta por la propulsión eléctrico-solar se basa en que nos permite mejorar la velocidad, rendimiento y economía tanto cuanto las leyes de la física faculten. La propulsión eléctrico-solar se convertirá en un motor barato multiuso para el traslado de cargas por todo el sistema solar.

Esta flexibilidad no excluye otros sistemas de propulsión. Para los lanzamientos desde la superficie de la Tierra al espacio, necesitaremos cohetes químicos o algún lanzador de alto empuje más eficiente. El sistema eléctrico-nuclear opera de forma similar al eléctrico-solar, pero elimina la dependencia de la luz solar para generar electricidad. La propulsión por láser obtiene su energía de un láser de alta potencia situado en la superficie terrestre; es idónea para programas de lanzamiento de encendido rápido. Las velas solares, propulsadas por la presión de la radiación solar, aunque arrancan despacio no requieren combustible. Los aceleradores dinámicos proporcionan un sistema de lanzamiento económico para cargas voluminosas que puedan aguantar aceleraciones de miles de gravedades. Mas para transportes a larga distancia y de alta velocidad, tanto de mercancías como de pasajeros, la propulsión eléctrico-solar parece el sistema a elegir.

Las prestaciones de un vehículo espacial eléctrico-solar han de habérselas con dos factores físicos condicionantes. Un límite está impuesto por la razón de empuje a peso de los motores cohete iónicos y el otro por la razón de potencia a peso para las superficies que colectan la energía solar. La relación empuje-peso limita la aceleración del vehículo espacial y es más importante para misiones cortas. Por ejemplo, si una nave puede acelerar a un centímetro por segundo al cuadrado (una milésima de la gravedad terrestre), será capaz de alcanzar la velocidad de 26 kilómetros por segundo en un mes. Cubrir distancias pequeñas rápidamente requiere una salida presta y por tanto una razón de empuje a peso alta.

La razón de potencia a peso limita la velocidad máxima del vehículo espacial, importante para viajes largos. Cuanto más delgada sea la superficie del colector solar, mayor será la potencia para un peso dado. Las leyes de la física colocan el límite de espesor en torno a un gramo por metro cuadrado. Esto es menos de una milésima del peso de los paneles solares en el mencionado *Expreso Kuiper*, por lo que un vehículo espacial eléctrico-solar en principio podría multiplicar por mil las actuaciones del *Expreso Kuiper*.

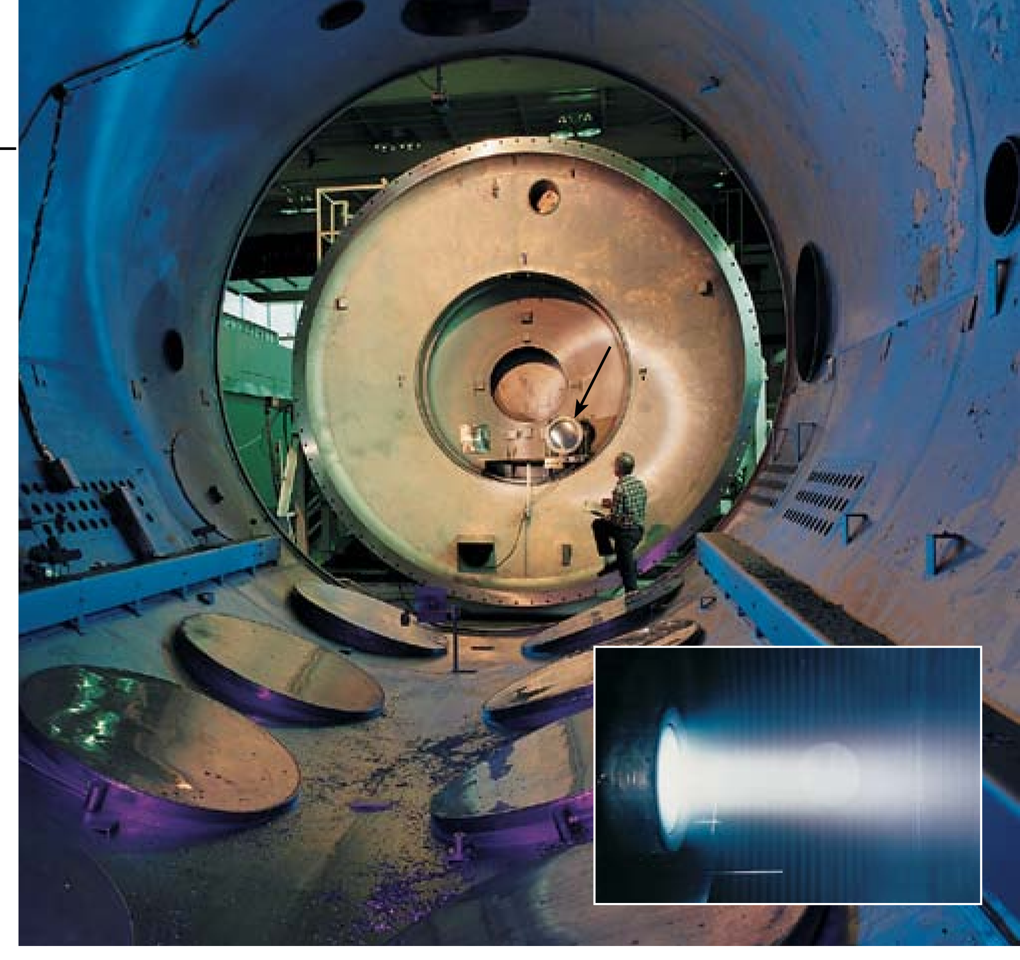
El *Expreso Kuiper* utilizaría sus motores eléctrico-solares para propul-

sarse cerca de la Tierra, para proceder luego sin propulsión el resto del viaje hasta la frontera del sistema solar. Un vehículo espacial rodeado de colectores de película delgada podría emplear su motor solar en cualquier parte del sistema solar, inclusive en el cinturón de Kuiper, donde la luz solar es 1000 veces más débil que aquí. En las proximidades de la Tierra tal vehículo alcanzaría velocidades de cientos de kilómetros por segundo, que le llevarían a Marte, Venus o Mercurio en menos de un mes. Un sistema diversificado de vehículos espaciales eléctrico-solares haría el sistema solar en su conjunto tan accesible para el comercio o la exploración como la superficie de la Tierra lo fue en la época de los barcos de vapor.

Aun cuando la fabricación de paneles solares de película delgada no supone ningún dispendio, su tamaño y finura dificultarán el despliegue. El problema del despliegue será mucho mayor para cargas pesadas. Los vehículos espaciales que transporten astronautas probablemente no podrán pesar menos de una tonelada. Un vehículo de una tonelada que tenga altas actuaciones y aproveche bien el propulsante necesitará colectores solares de una hectárea de superficie.

Me interesan sobre todo las misiones no tripuladas. Para sondas robotizadas, las ventajas de la propulsión eléctrico-solar pueden obtenerse reduciendo el peso total de toneladas a kilogramos. El proceso de miniaturización, que condujo de los *Voyager* al *Expreso Kuiper*, puede extrapolarse mucho más lejos. El vehículo espacial eléctrico-solar del futuro pesará pocos kilogramos y llevará un panel solar de 10 a 20 metros de diámetro. Tal vehículo sería ideal para la exploración científica y quizá también para la mayoría de las empresas comerciales y militares. La principal tarea de los vehículos espaciales (científicos, comerciales o militares) es el manejo de información, que ya dominamos mediante máquinas de menos de un kilogramo. La propulsión eléctrico-solar dará a tales misiones una flexibilidad que les faltaba a los motores químicos. Vehículos espaciales con propulsión eléctrico-solar pueden vagar libremente alrededor del sistema solar, modificando sus trayectorias para ajustarse a las necesidades cambiantes de la ciencia.

¿Dónde irán nuestras microflotillas dentro de 100 años? A cualquier parte.



3. EL MOTOR IONICO (*indicado con la flecha*) puede ser la técnica de propulsión elegida para el próximo siglo: es barato, simple y eficiente. Este prototipo se halla en fase de ensayos de resistencia en una cámara de vacío del Centro de Investigación Lewis en Cleveland. La fotografía interior muestra una vista lateral del motor durante un ensayo de encendido. La electricidad atraviesa el gas xenón en el motor; los átomos resultantes cargados eléctricamente, o iones, son expulsados fuera del motor creando el chorro propulsivo. El empuje de los motores iónicos, modesto aunque persistente, podría acelerar un vehículo espacial hasta altas velocidades, agilizando la exploración del sistema solar.

Solemos olvidar que el grueso del terreno del sistema solar no está en los planetas. Estos contienen la mayor parte de la masa exterior al Sol, pero la superficie más extensa reside en pequeños objetos: satélites, asteroides y cometas. Con excepción de los grandes satélites y de algunos asteroides, toda esta superficie se halla por explorar. Nuestros vehículos espaciales viajarán a lugares no hollados ni vistos.

La naturaleza ha configurado el sistema solar de tal forma que la mayor parte de los potenciales destinos son objetos con gravedad débil, directamente accesibles para vehículos espaciales eléctrico-solares de bajo empuje. Los lugares de aterrizaje de los vehículos espaciales del siglo XXI serán más fáciles de encontrar que los puertos profundos lo fueron para los barcos de vapor del siglo XIX.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SCIENCE AND SPACE. Freeman J. Dyson en *The First 25 Years in Space*. Dirigido por Allan Needell. Smithsonian Institution Press, 1983.

MAJOR OBSERVATORIES IN SPACE. Freeman J. Dyson en *Observatories in Earth and Beyond*. Dirigido por Yoji Kondo. Kluwer Academic Publishers, 1990.

PLUTO MISSION PROGRESS REPORT: LOWER MASS AND FLIGHT TIME THROUGH ADVANCED TECHNOLOGY INSERTION. Robert L. Staehle et al. Report IAF-93-Q5410, 44.º Congreso de la International Astronautical Federation, octubre, 1993.

SMALL BODY RENDEZVOUS MISSION USING SOLAR ELECTRIC PROPULSION: LOW COST MISSION APPROACH AND TECHNOLOGY REQUIREMENTS. Roy Kakuda, Joel Sercel y Wayne Lee. Report IAA-L-0710, Conferencia Internacional del Institute of Aeronautics and Astronautics sobre Misiones Planetarias de Bajo Coste, abril, 1994.

¿Por qué trasladarse?

Millones de personas podrían liberarse de sus vehículos

Robert Cervero



De aquí a veinte años, el transporte automovilístico de algunos países avanzados podría incorporar la técnica e información que se había reservado a la guerra táctica. Los sistemas de ayuda a la conducción instalados a bordo, alimentados por datos de seguimiento obtenidos vía satélite, indicarán las direcciones a través de una suave voz digital. En las grandes ciudades, las pantallas de tráfico avisarán de embotellamientos y rutas alternativas. El control por ordenador y los mecanismos de orientación introducidos en pasillos de denso tráfico permitirán la circulación, a una distancia mínima, de coches y camiones debidamente equipados. Tarjetas de crédito especiales abrirán el acceso a las autopistas de peaje, al aparcamiento en el centro y al asiento del tren. Algunos expertos prevén "autobuses de coches", un tipo de remolque-tractor que podría llevar hasta 20.000 coches por hora por un carril de autopista rápida —lo que multiplicaría por diez su capacidad habitual.

Esta constelación de técnicas de la nueva era es sólo una parte de los grandes proyectos que se acarician en Europa y los Estados Unidos. En esa línea, los "Tres Grandes" fabricantes de coches de Detroit y el Ministerio de Transporte de los Estados Unidos han gastado ya, o han prometido, miles de millones de dólares en investigación, desarrollo y comercialización del Sistema de Información del Transporte, cuyo loable propósito no es otro que reforzar el rendimiento, la confortabilidad y la seguridad del tráfico. Menos encomiables son los costes: creciente consumo de carburante, contaminación ambiental, expansión suburbana y degradación de las ciudades.

Una opción alternativa convincente consistiría en empezar por reducir la necesidad de viajar. Existen ya las herramientas y las técnicas para reducir drásticamente el desplazamiento diario. Ciertos barrios, bien diseñados, permiten ir a pie o en bicicleta a los sitios; las telecomunicaciones y los ordenadores han de facilitar el trabajo en casa o en algún punto de su entorno. Se ahorra así tiempo, energía, recursos naturales y desgaste psicológico.

Partidarios de ese nuevo urbanismo son arquitectos de renombre, como Andres Duany y Peter Calthorpe, empeñados en recrear las amables poblaciones peatonales de antaño. Lugares de este estilo serían Princeton, Annapolis y Savannah, ciudades pequeñas que poseen núcleos centrales llenos de vida a los que sus residentes llegan a pie, espacios cívicos notables, calles trazadas a escuadra y bordeadas de árboles, y combinación de viviendas y tiendas en la calle principal. Frente a los barrios contemporáneos, de planificación maestra, donde la gente queda confinada en sus coches o sus casas, estas comunidades "neotradicionales" permitirían que gente de todas las edades y profesiones estuviera en contacto a diario. Los nuevos urbanistas consideran que este contacto promovería la cohesión social y estrecharía los lazos de unión entre la gente y su espacio.

Debido al tibio mercado inmobiliario y al escepticismo entre prestamistas y urbanistas, se han construido muy pocas poblaciones neotradicionales. Quizá los mejores ejemplos que podemos ofrecer sean los de Seaside, en Florida, y Kentlands, en Maryland. Al no depender tanto del coche, la vida de estas comunidades ahorra energía. Más rentables aún serían las poblaciones autosuficientes, en donde la gente vive, trabaja y compra. Hace casi un siglo, a fin de descongestionar Londres, el arquitecto-urbanista Sir Ebenezer Howard avanzó la idea de construir comunidades satélite autosuficientes, separadas por cinturones verdes y unidas por ferrocarril. El gobierno británico adoptó las ideas de Howard, y entre 1946 y 1991 construyó 24 comunidades de estas características, que incluyen asentamientos como Milton Keynes y Redditch, que se efectuaron en campo abierto.

En Gran Bretaña, la mayoría de estas nuevas ciudades son en buena medida autosuficientes —alrededor de los dos tercios de su fuerza de trabajo reside en la localidad—. En las ciudades nuevas de los alrededores de París o Estocolmo, sin embargo, la mayoría trabaja fuera de la comunidad; pero viajan, la mitad al menos, en tren. No ocurre así con las nuevas ciudades norteamericanas, pensemos en Columbia y Reston, ciudades dormitorio, habitadas por conductores que viajan regularmente solos a su lugar de trabajo. Otros enclaves que difícilmente desaparecerán, los espacios más autosuficientes de América (con tasas de transporte de bajo consumo de combustible per cápita) son Manhattan y San Francisco, los centros urbanos de mayor densidad.

Los avances en el terreno de las telecomunicaciones y los cambios en la forma en que la gente vive y trabaja empiezan ahora a aportar a otras regiones algo de esta autosuficiencia. El número de trabajadores contratados, autónomos e industrias artesanales está en alza, y los ordenadores, aparatos multimedia y comunicaciones por satélite se hallan cada vez más al alcance del consumidor medio. Avances que, durante los próximos años, fomentarán un rápido crecimiento de las empresas relacionadas con la vivienda.

Los lugares de trabajo dispersos se transformarán también en telecentros vecinales, equipados con capacidad para videoconferencias, información telefónica, transmisión por fax y correo; ello facilitará acudir a pie o en bicicleta al trabajo algunos días de la semana, y trabajar en casa los otros. En Orange County y Sacramento, varios urbanistas han incluido oficinas en casa y telecentros vecinales en nuevas urbanizaciones de uso mixto. También se han abierto pequeños restaurantes en el barrio y algunas cafeterías que, para los que trabajan y viven en la urbanización,

se han convertido en espacios donde tomar algo, relacionarse y "conectar". Los jóvenes cibernéticos de hoy en día, que han crecido entre la Internet y los medios interactivos, pueden ser incluso más receptivos ante la idea de trabajar en casa cuando sean adultos.

Durante los últimos años la técnica ha permitido a una afortunada minoría vivir donde ha querido. Muchas de estas personas —especialistas en programación, asesores independientes, escritores, y otros por el estilo— están escogiendo espacios bastante apartados, como Santa Fe en el sur y Peterborough en el norte. Otras poblaciones siguen ahora esta tendencia. A fin de poder ofrecer trabajo a sus habitantes y para evitar que tengan que salir a buscarlo fuera, la población de Oberlin ha construido un centro de telecomunicaciones en el corazón de la ciudad. Las técnicas avanzadas —tales como sistemas de comunicación por satélite, la propuesta autopista de la información y trenes de alta velocidad— podrían producir una constelación de pueblos urbanos autosuficientes a través de Norteamérica.

Los últimos 150 años han supuesto un ciclo de constantes avances del transporte urbano y la descentralización. Las nuevas técnicas del transporte han ampliado el entorno del desarrollo urbano, elevando el consumo de combustible per cápita, arrasando campos de cultivo y espacios abiertos. La red de autovías y autopistas, los crecientes ingresos, las preferencias de residencia, los prejuicios y otros factores económicos y sociales han llevado a muchas familias a alejarse de los centros urbanos. Sin embargo, al no cobrar a los motorizados el coste social real, hemos promocionado excesivamente los viajes en coche y hemos subvencionado la expansión urbana. La diferencia entre automovilidad y accesibilidad es la diferencia entre progresar en estas técnicas costosas de transporte, o bien diseñar nuevos tipos de comunidades con recursos propios. La intensificación automovilística —la capacidad de trasladarse con la comodidad del coche particular— es y ha sido el paradigma dominante que ha orientado las inversiones en transporte a lo largo de este siglo.

La accesibilidad, por el contrario, se encuentra al crear lugares que reducen la necesidad de viajar y, así, contribuyen a conservar los recursos, protegen el medio y fomentan la justicia social. Con técnica, viajaremos. Con comunidades autosuficientes, prosperaremos.

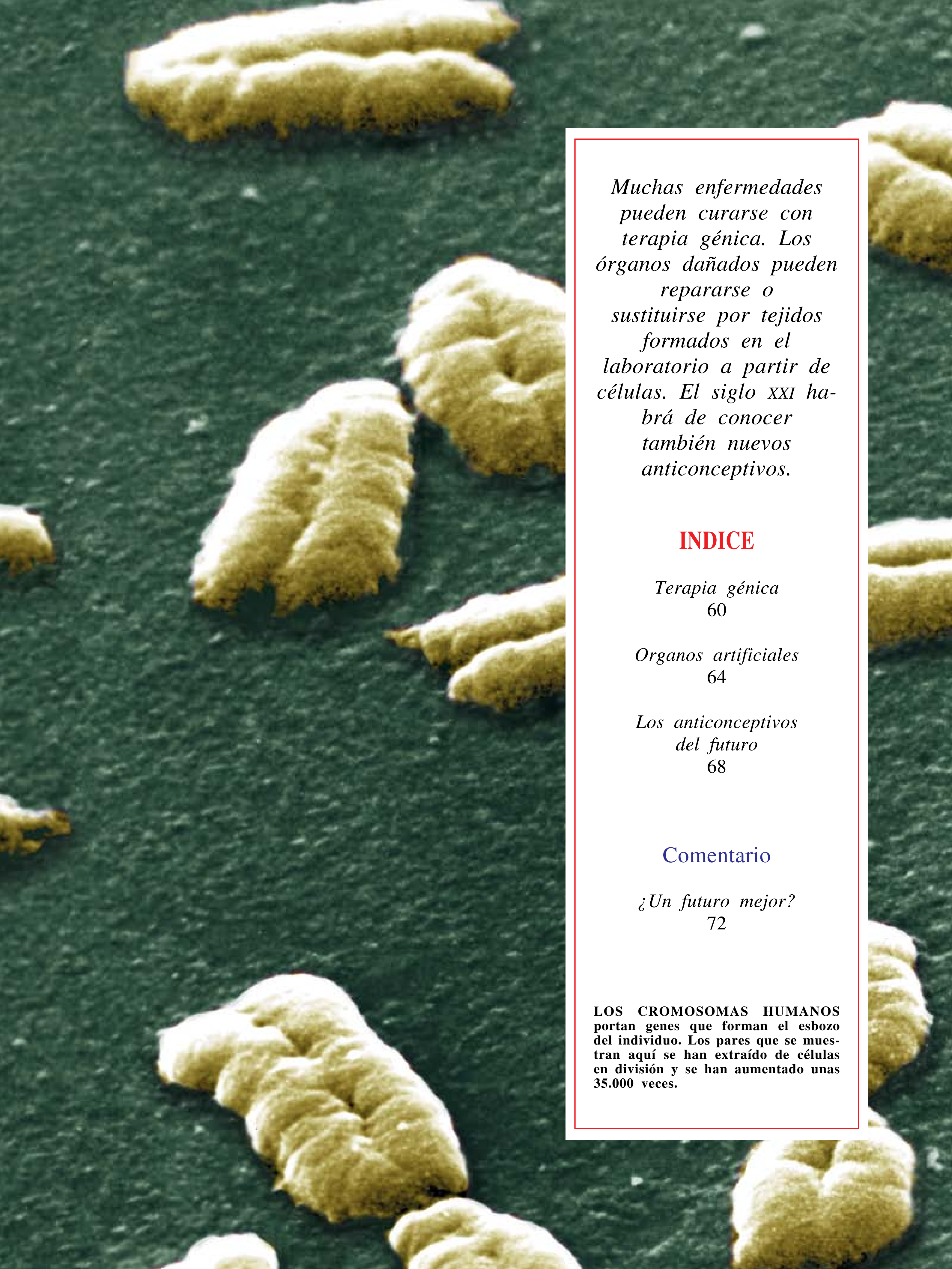


EL CENTRO DE LA CIUDAD se convierte en foco cívico en Kentlands, una comunidad planificada en el sur de Maryland. La convergencia de sus calles crea más rutas desde el centro para mejor distribución del tráfico. Otro principio del credo del "nuevo urbanismo" consiste en la cercanía de las viviendas, lo que permite a sus residentes caminar hasta las tiendas, parques y centros comunitarios y relacionarse entre sí más fácilmente.

ROBERT CERVERO es profesor de urbanismo en la Universidad de California en Berkeley.

MEDICINA





Muchas enfermedades pueden curarse con terapia génica. Los órganos dañados pueden repararse o sustituirse por tejidos formados en el laboratorio a partir de células. El siglo XXI habrá de conocer también nuevos anticonceptivos.

INDICE

Comentario

LOS CROMOSOMAS HUMANOS portan genes que forman el esbozo del individuo. Los pares que se muestran aquí se han extraído de células en división y se han aumentado unas 35.000 veces.

Terapia génica

Centenares de pacientes reciben ya un tratamiento que se generalizará el siglo que viene

W. French Anderson

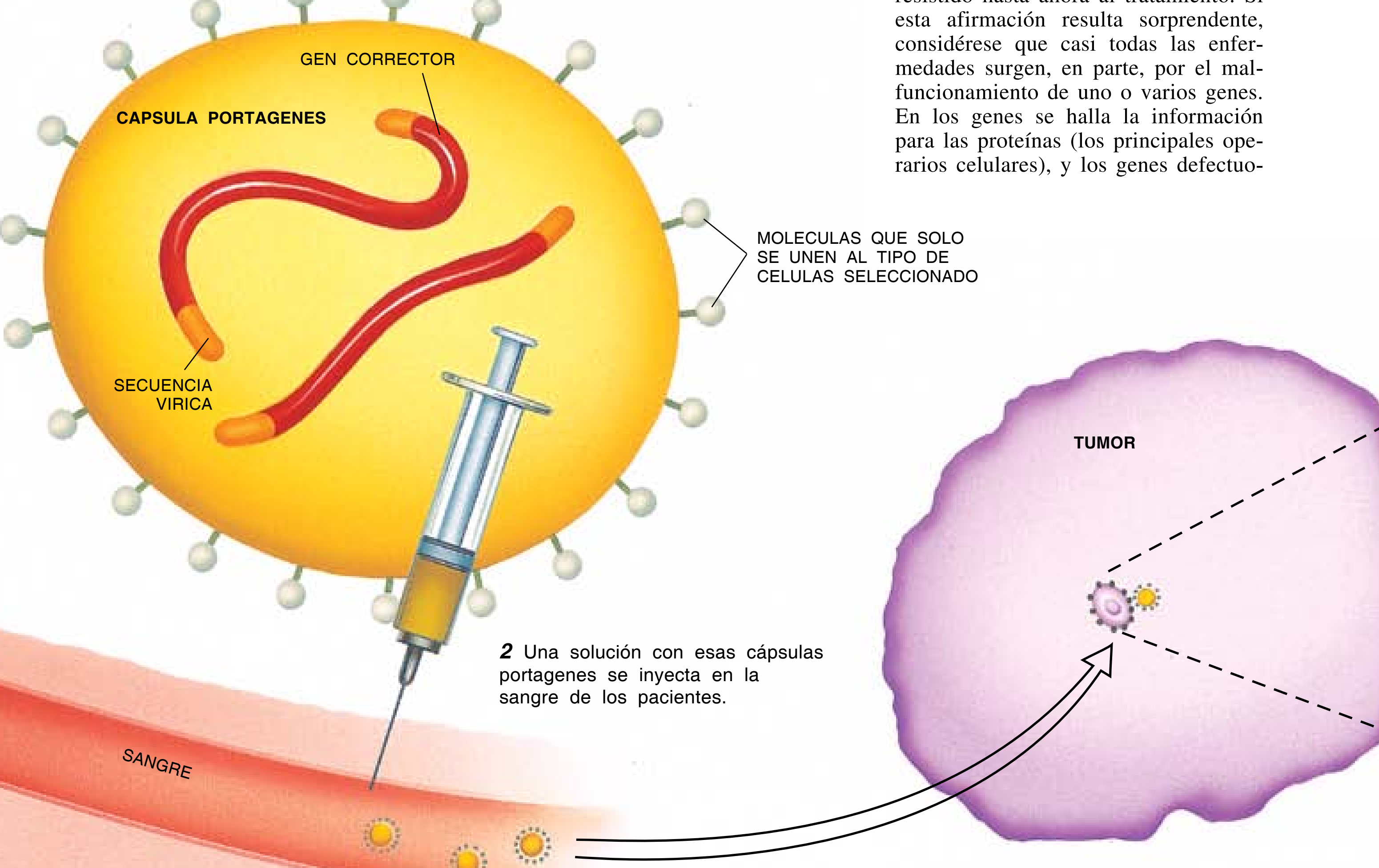
El 14 de septiembre de 1990, Ashanti DeSilva, una niña de apenas cuatro años, se convertía en el primer paciente sometido a terapia génica. Ashanti, que había heredado un gen defectuoso de cada progenitor, sufría una inmunodeficiencia combinada grave (SCID). Ese gen produce desaminasa de adenosina, una enzima necesaria para la operación correcta del sistema inmunitario. La falta de esa enzima crítica inutilizó el sistema inmunitario de Ashanti, haciéndola vulnerable a multitud de infecciones.

El tratamiento fue realizado por R. Michael Blaese, Kenneth W. Culver y yo mismo, entre otros. Extrajimos leucocitos del sistema inmunitario de su cuerpo, insertamos copias normales del gen defectuoso y devolvimos las células tratadas al torrente circulatorio. El experimento fue un éxito. Tras recibir cuatro transfusiones en cuatro meses, las constantes de Ashanti mejoraron. Con una atención complementaria esporádica, aquella niña en perpetua cuarentena, siempre enferma, se ha transformado en una saludable chica de nueve años, que ama la vida y hace de todo.

A lo largo de la historia, se han producido tres grandes avances en el control de las enfermedades. Cuando la sociedad empezó a establecer sistemas sanitarios y adoptar otras medidas de salud pública, se frenó el impacto de las infecciones. A continuación, la introducción de la anestesia en las intervenciones quirúrgicas permitió a los cirujanos curar realmente ciertos males. (En las apendicitis, por ejemplo, la extirpación del órgano resuelve el problema para toda la vida.) La introducción de vacunas y antibióticos marcó el comienzo de la tercera revolución, haciendo más fácil prevenir o corregir muchas enfermedades transmitidas por microbios.

La terapia génica constituirá una cuarta revolución, ya que la introducción de genes seleccionados en las células de un paciente puede sanar o aliviar la mayoría de las enfermedades, incluidas muchas de las que se han resistido hasta ahora al tratamiento. Si esta afirmación resulta sorprendente, considérese que casi todas las enfermedades surgen, en parte, por el malfuncionamiento de uno o varios genes. En los genes se halla la información para las proteínas (los principales operarios celulares), y los genes defectuo-

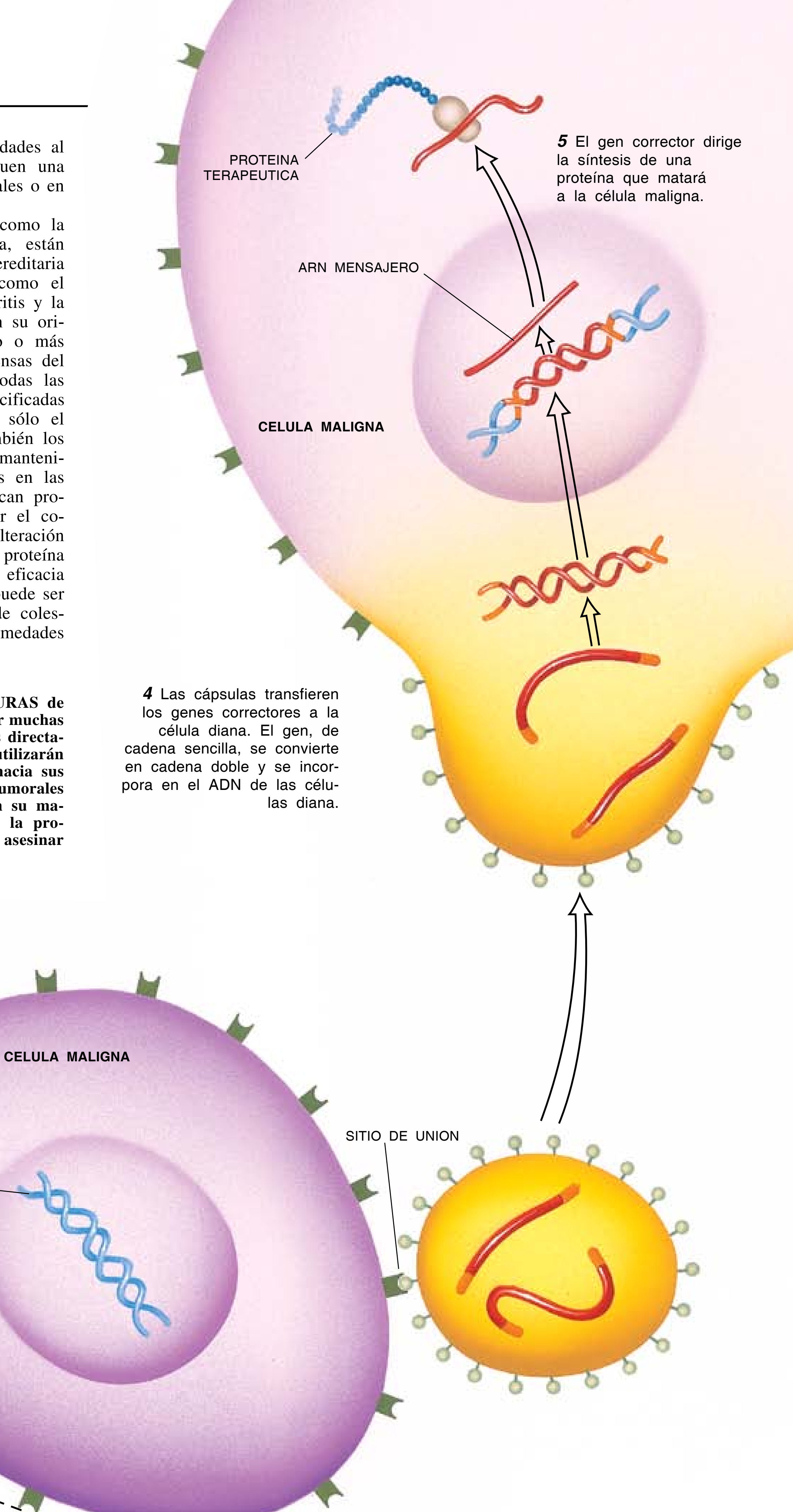
1 Los genes víricos se sustituyen por los genes correctores de la enfermedad, y el material resultante se envuelve en una cápsula transportadora de origen vírico.



2 Una solución con esas cápsulas portagenes se inyecta en la sangre de los pacientes.

sos pueden producir enfermedades al hacer que las células fabriquen una proteína en cantidades anormales o en una forma aberrante.

Más de 4000 afecciones, como la SCID y la fibrosis quística, están causadas por la alteración hereditaria de un gen. Muchas otras, como el cáncer, cardiopatías, sida, artritis y la senilidad, por ejemplo, tienen su origen en la alteración de uno o más genes implicados en las defensas del cuerpo. En estas defensas, todas las cuales requieren proteínas especificadas genéticamente, participan no sólo el sistema inmunitario, sino también los mecanismos encargados del mantenimiento del cuerpo. Pensemos en las células hepáticas. Estas fabrican proteínas encargadas de eliminar el colesterol de la sangre; si una alteración en el gen que determina esa proteína merma la concentración o la eficacia del polipéptido, el resultado puede ser un aumento en los niveles de colesterol, arteriosclerosis y enfermedades cardíacas.



1. LAS ESTRATEGIAS FUTURAS de terapia génica permitirán tratar muchas enfermedades inyectando genes directamente en sangre. Para ello se utilizarán virus que llevarán los genes hacia sus objetivos específicos, células tumorales por ejemplo. Allí, descargarán su material genético, que producirá la proteína terapéutica (capaz de asesinar células malignas).

Para el año 2000, los científicos que trabajan en el Proyecto Genoma Humano habrán determinado la localización cromosómica de más del 99 por ciento de los genes humanos, y habrán descifrado su contenido. Con esa información, las investigaciones dirigidas a conocer la función de cada uno de esos genes progresará rápidamente. Ello permitirá identificar los genes responsables de muchas enfermedades.

Existen varios métodos para introducir genes sanos en las células dañadas. El más eficaz recurre a virus modificados y empleados como vectores de tales genes. Los virus son útiles, en parte, por su capacidad natural para introducirse dentro de las células e insertar en el hospedador el material genético que portan. Antes, sin embargo, es preciso eliminar del genoma vírico los genes que determinan las proteínas que los propios virus utilizan para reproducirse y causar enfermedades. Si en el lugar de esos genes se colocan los genes correctores, tendremos un sistema idéntico en apariencia al virus original, que puede transportar genes útiles hasta el interior de las células, pero que no causa enfermedades.

La terapia génica puede aplicarse de dos maneras. Una, la seguida con Ashanti, consiste en insertar una copia sana de un gen en las células del paciente, para así compensar el efecto de un gen defectuoso. (No es obligado siempre que los genes se integren en determinado sitio de un cromosoma del paciente; basta con que sobreviva y produzca los niveles terapéuticos de la proteína correspondiente.)

La segunda forma consiste en introducir un gen especialmente diseñado para que suministre una nueva propiedad a las células. Varios grupos están investigando un tratamiento con esas características para pacientes infectados con el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), agente del sida. En este caso, lo que se introduce en las células sanguíneas del paciente son copias de un gen que obstaculiza la replicación del VIH. La idea es frenar el progreso de la enfermedad. Podrían también introducir genes para prevenir ciertas enfermedades. Por ejemplo, en vez de esperar que una mujer susceptible de sufrir cáncer de mama llegue a enfermar, se le podrían suministrar genes protectores mientras aún está sana.

Es posible que durante algunos años la terapia génica se siga aplicando sólo a células somáticas, que son todos los tipos celulares, excepto el esperma, los óvulos y sus células precursoras. En teoría, la terapia génica podría aplicarse también a las células reproductoras o germinales. La modificación de las células germinales afectaría a todos los descendientes del paciente original, no sólo a éste. Muchos aspectos de la vida moderna, como el tabaco y la exposición a radiaciones, pueden también alterar el patrimonio genético de las próximas generaciones. Pero la aplicación de la terapia génica a las células germinales abriría la caja de Pandora de las consideraciones éticas, algo que pocos investigadores desean, al menos hasta que se domine mucho mejor la terapia génica de las células somáticas.

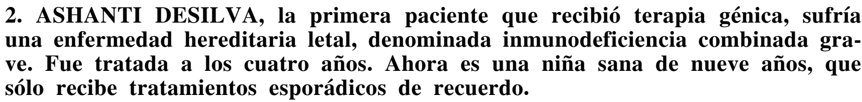
Disponemos de varias estrategias de terapia génica en células somáticas. La técnica más utilizada es la terapia *ex vivo* (o "fuera del cuerpo"), aplicada a Ashanti: se extraen del paciente células con genes defectuosos y se le introducen copias normales del ADN afectado; luego se tornan al organismo. Esta terapia suele utilizar células sanguíneas porque muchos defectos genéticos alteran el funcionamiento de uno u otro tipo de tales células. El problema es que las células sanguíneas tienen una vida limitada. Las células corregidas desaparecen poco a poco, y hay que realizar tratamientos periódicos.

La investigación habrá de hacer hincapié en las células madre o precursoras de la médula ósea: células inmaduras que dan lugar a todas las clases de células sanguíneas y que son las encargadas de reponerlas. Las células precursoras se convierten así en las dianas ideales para la terapia génica, ya que parecen ser inmortales:









2. ASHANTI DESILVA, la primera paciente que recibió terapia génica, sufría una enfermedad hereditaria letal, denominada inmunodeficiencia combinada grave. Fue tratada a los cuatro años. Ahora es una niña sana de nueve años, que sólo recibe tratamientos esporádicos de recuerdo.

W. FRENCH ANDERSON es director de los laboratorios de terapia génica de la facultad de medicina de la Universidad del Sur de California.

duran toda la vida del paciente. Constituyen, por tanto, un depósito permanente de genes introducidos por ingeniería genética.

Aunque se pueden obtener células precursoras de la médula ósea, no resulta fácil introducir genes en ellas, ni conseguir que proliferen una vez reintroducidas en el cuerpo. Aunque algo se está avanzando. Donald B. Kohn, del Hospital Infantil de Los Angeles, ha logrado que tres recién nacidos con SCID, que fueron tratados hace dos años con genes insertados en sus células precursoras, se encuentren ahora perfectamente. Sus células sanguíneas producen la enzima que les faltaba al nacer. Puesto que los niños se desarrollan rápidamente, sus células precursoras son muy activas. En los pacientes de más edad, sin embargo, las células precursoras producen nuevas células sanguíneas más lentamente. Pero el problema admite solución. Se están consiguiendo grandes avances en el aislamiento de las sustancias que el cuerpo utiliza para provocar la división de las células precursoras.

Un segundo método de terapia de genes en células somáticas es el tratamiento *in situ* (o "en el mismo lugar"). En este procedimiento, se introducen portadores de los genes correctores directamente en los tejidos donde se necesitan los genes. Es la estrategia ideal cuando el defecto está localizado, pero no puede corregir problemas que afectan a todo el cuerpo.

El tratamiento *in situ* se está aplicando en varias enfermedades. En el caso de la fibrosis quística, que afecta a los pulmones, se introducen en los bronquios portagenes con copias sanas del gen responsable de la fibrosis quística. Como primer paso en el tratamiento de la distrofia muscular, se ha inyectado un gen directamente en el tejido muscular en animales, para comprobar si conseguían así fabricar proteínas musculares normales. Varios equipos han introducido vectores "suicidas" en tumores, vectores que portan un gen diseñado para hacer que las células cancerosas se suiciden al ser tratadas con ciertos agentes químicos.

La terapia *in situ* tiene todavía el inconveniente de la falta de vías seguras y eficaces para implantar genes correctores en ciertos órganos. Además, igual que en el caso de la terapia *ex vivo*, los genes no siempre producen buenas cantidades de las proteínas que cifran. Las células alteradas no suelen ser inmortales, y por tanto los genes útiles se pierden cuando mueren las células que los portan. Finalmente, en los dos tipos de terapias, una vez que los genes entran en las células, se integran al azar en el ADN de los cromosomas. Aunque puede que no pase nada, en algunos casos podría acarrear graves consecuencias: si cuando se integra un gen corrector interrumpe un gen supresor de tumores, que protege al cuerpo contra la aparición de tumores, puede originarse un cáncer.

La esperanza del futuro está en la tercera clase de tratamientos, la terapia *in vivo* ("dentro del cuerpo"), que no existe todavía. Los médicos inyectarán vectores de genes en la sangre, a la manera de fármacos. Una vez dentro del cuerpo, los vectores se encontrarán con sus células dianas (ignorando a las demás) y transferirán su información genética.

Se ha progresado bastante en el refinamiento de las técnicas empleadas para encauzar los vectores hacia tipos celulares específicos. Menos, si se trata de que los vectores inserten su carga génica en las células diana o que eludan el sistema inmunitario del paciente. La inserción aleatoria en el ADN sigue siendo aún un problema. Pero soy optimista. Y barrunto que para el año 2000 se estará ya ensayando con las primeras versiones de vectores inyectables y capaces de llegar a las células deseadas.

Un capítulo que no debemos ignorar es el de los costos. Durante los próximos años, los ensayos clínicos, carísimos, continuarán reservados a los hospitales poderosos. Pero a diferencia de los trasplantes de corazón y similares, que siempre valdrán una fortuna, la terapia génica acabará siendo más sencilla y barata. Mi opinión es que dentro de 20 años la terapia génica será una rutina médica más.

Ninguna reflexión sobre terapia génica está completa si dejamos de lado la vertiente ética. La técnica para corregir con un gen una enfermedad letal sirve también para introducir un gen con propósitos menos nobles. Existe, por tanto, el peligro real de la eugenesia. Una cosa es ofrecer una existencia normal a un individuo enfermo, y otra bien distinta intentar "mejorar" al individuo normal, entiéndase lo que se entienda por "normal". La situación será incluso más peligrosa cuando empecemos a alterar células germinales, lo que condicionaría a las siguientes generaciones.

Nuestra sociedad cayó ciegamente en la era de la energía nuclear y en la del DDT y otros plaguicidas. No podemos permitirnos entrar a ciegas en la era de la ingeniería genética. Debemos entrar en esta excitante nueva era con la conciencia de que la terapia génica puede utilizarse para lo bueno y también para lo malo.

Enfermedades sometidas a ensayos clínicos de terapia génica

- Cáncer (melanoma, riñón, ovario, neuroblastoma, cerebro, cabeza, garganta, pulmón, hígado, mama, colon, próstata, mesotelioma, leucemia, linfoma, mieloma múltiple)
- SCID
- Fibrosis quística
- Enfermedad de Gaucher
- Hipercolesterolemia familiar
- Hemofilia
- Deficiencia en la fosforilasa de purina
- Deficiencia en la antitripsina alfa-1
- Anemia de Fanconi
- Síndrome de Hunter
- Granulomatosis crónica
- Artritis reumática
- Enfermedad vascular periférica
- Sida

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ETHICS OF HUMAN GENE THERAPY. Le-Roy Walters en *Nature*, vol. 320, páginas 225-227, 20 de marzo de 1996.

HUMAN GENE THERAPY. W. F. Anderson en *Science*, vol. 256, páginas 808-813, 8 de mayo de 1992.

ALTERED FATES: GENE THERAPY AND THE RETOOLING OF HUMAN LIFE. Jeff Lyon y Peter Gorner. W. W. Norton, 1995.

Organos artificiales

Tejidos artificiales diseñados mediante ingeniería biológica están llamados a ser la base del tratamiento de muchas lesiones y enfermedades

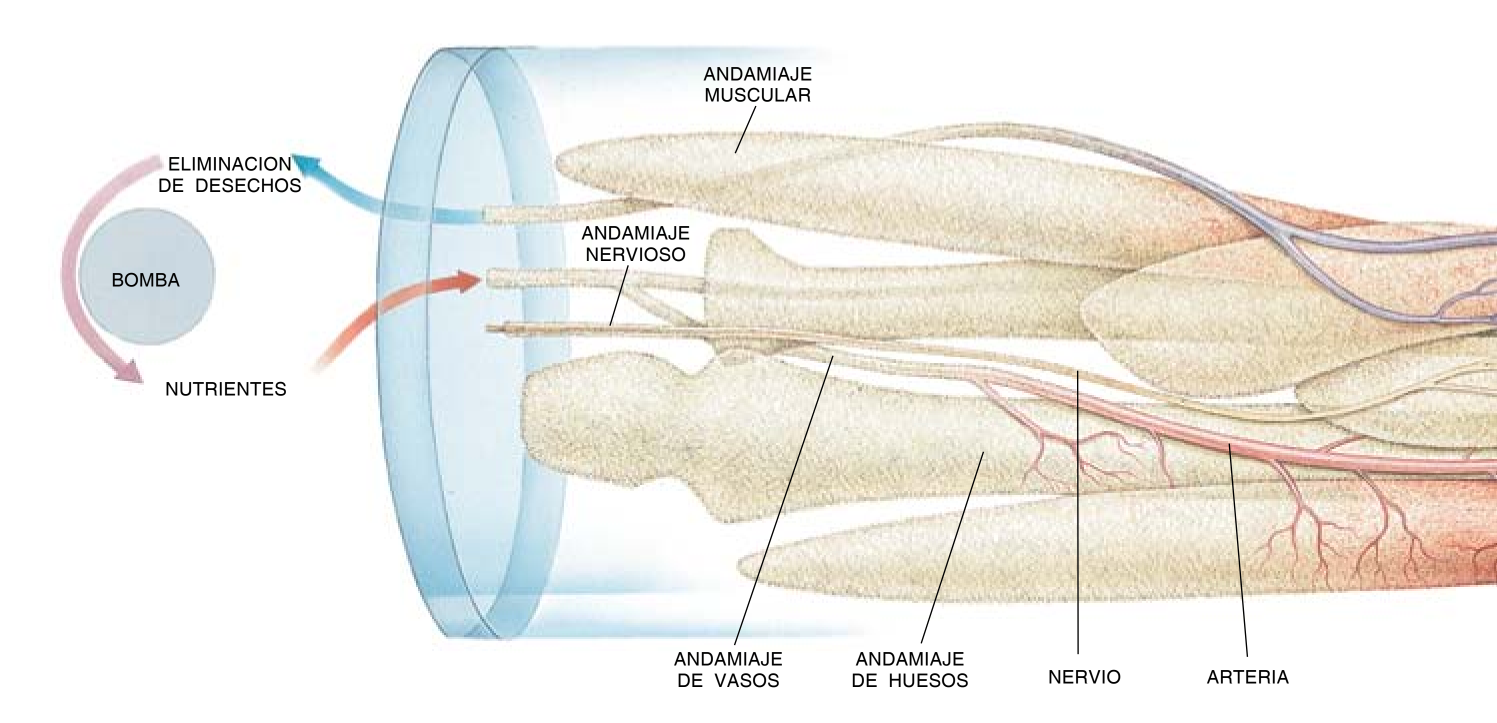
Robert Langer y Joseph P. Vacanti

En una tradición que se remonta al siglo tercero se recoge una curación milagrosa atribuida a la intercesión de los santos Cosme y Damián, dos hermanos médicos que murieron mártires el año 295 de nuestra era. Un clérigo romano ha sufrido la amputación de una pierna y se debate entre la vida y la muerte. Se decide entonces trasplantarle la pierna de un criado africano que acaba de fallecer. El trasplante prende y el clérigo recupera su salud. Lo que en un momento adquiere la consideración de hecho milagroso, se ha convertido en fenómeno rutinario gracias a los adelantos de la ciencia. Los cirujanos llevan ya más de 30 años reimplantando miembros amputados, y los trasplantes de corazón, hígado o riñón constituyen algo tan común, que el mayor obstáculo para un trasplante no se encuentra en la técnica quirúrgica, sino en la escasez de órganos disponibles.

En los tres próximos decenios, la medicina irá más allá del trasplante y entrará en una era nueva de fabricación de tejidos corporales. En vez de cambiar los órganos de sitio, se construirán. Los avances en biología molecular y en elaboración de plásticos ya han permitido fabricar tejidos artificiales que se parecen a sus equivalentes naturales y funcionan como ellos. La ingeniería genética puede producir células trasplantables universales —células que no provocan rechazo por parte del sistema inmunitario—, que podrán utilizarse en tejidos diseñados para cada caso. La confluencia de técnicas permitirá el desarrollo de los pasos intermedios que hagan posible el uso rutinario de esta bioingeniería. Se está ensayando con cría de animales cuyos tejidos puedan ser inmunológicamente aceptables por el hombre, así como en el desarrollo de fármacos que impidan el rechazo. Por otro lado, la microelectrónica podría salvar el hiato que separa viejas y nuevas técnicas.

Cada año millones de personas sufren la pérdida de tejidos o de órganos como consecuencia de accidentes, defectos congénitos o enfermedades destructoras (cáncer). La introducción de nuevos fármacos, técnicas quirúrgicas y dispositivos médicos han colaborado eficazmente en la atención médica de estos pacientes. La ciclosporina y el tracolimus (Prograf) son fármacos inmunosupresores que evitan el rechazo del tejido trasplantado; la laparoscopia y otras técnicas no invasivas han reducido el trauma quirúrgico; y la diálisis o las máquinas que sustituyen el corazón o el pulmón consiguen ahora mantener con vida pacientes cuya muerte hubiera sido irremisible en corto plazo.

Con todo, estos tratamientos son imperfectos. El control de la diabetes mediante la inyección de insulina, por ejemplo, consigue un éxito sólo parcial. La inyección de la hormona, una o varias veces a lo largo del día, ayuda a las células del diabético a absorber la glucosa (una fuente clave de energía) de la sangre. Pero la dosificación adecuada de la insulina para cada paciente puede variar incluso de una hora a otra. A menudo las cantidades



no pueden determinarse con la precisión suficiente para mantener los niveles normales de azúcar y evitar así las complicaciones ulteriores de la enfermedad: ceguera, fallo renal y cardiopatías.

Las innovaciones en el diseño de biosensores y administración de fármacos dejarán anticuadas las inyecciones de insulina. En muchos diabéticos, la enfermedad tiene su origen en la destrucción del tejido de los islotes pancreáticos donde se produce la hormona. En otras personas, el páncreas produce insulina, pero no en la cantidad suficiente. Es posible imaginar un dispositivo que imite la función del páncreas, registrando los niveles de glucosa y segregando en respuesta la cantidad precisa de insulina en cada momento.

Se ha desarrollado ya parte de la técnica para la construcción de un sensor de glucosa, que puede llevarse como un reloj de pulsera. Se acaba de demostrar que se puede aumentar transitoriamente la permeabilidad de la piel mediante campos eléctricos o por ondas de ultrasonidos de baja frecuencia, permitiendo la extracción de la glucosa y moléculas similares. La cantidad de glucosa sustraída del organismo puede medirse con una reacción catalizada por la enzima glucosa oxidasa; también, los sensores de luz podrían detectar la absorbancia de la glucosa en la sangre.

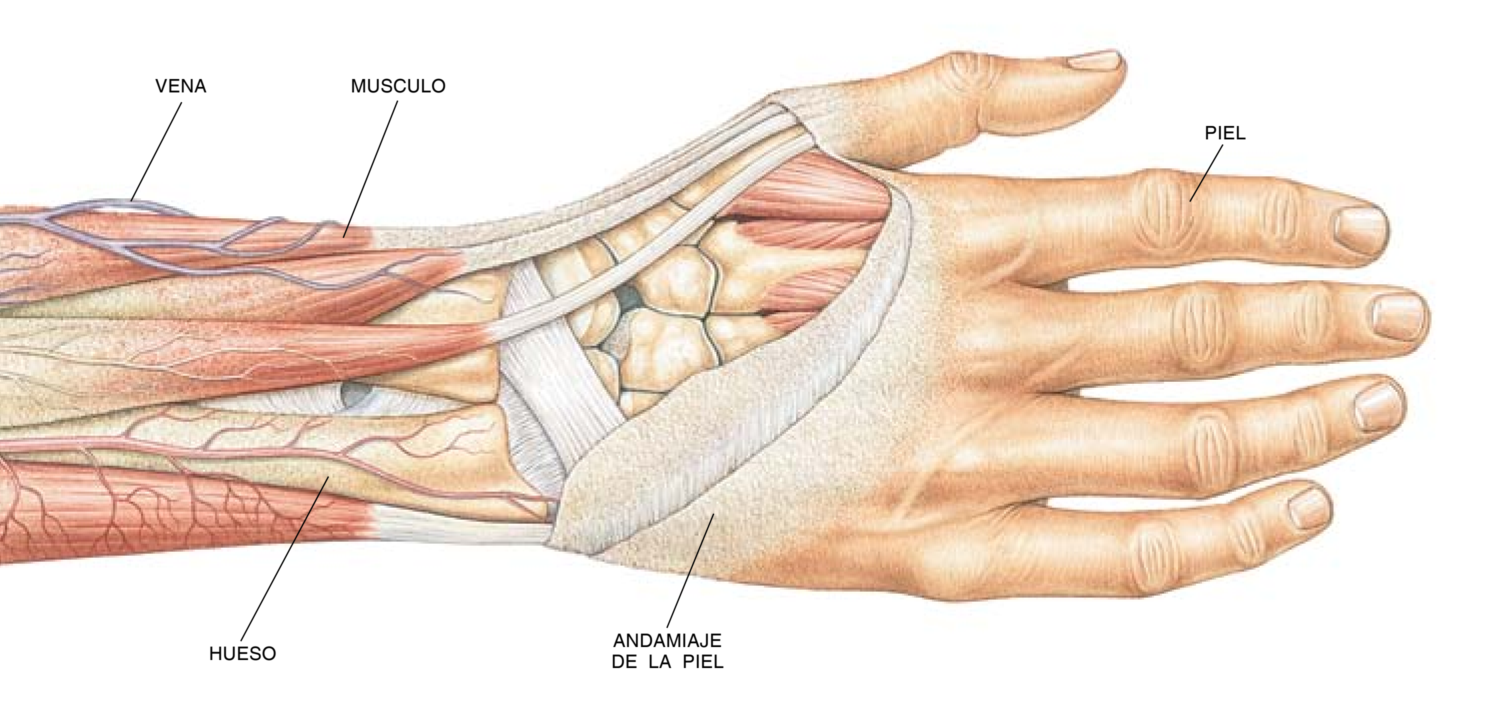
Estos sensores podrían conectarse por medio de microprocesadores con una unidad activable que hiciera penetrar la insulina en la sangre a través de la piel, por los mismos medios con los que se consiguió extraer la glucosa. El instrumento liberaría insulina en una proporción correspondiente a la cantidad de glucosa detectada.

También podría construirse un instrumento de plástico semipermeable. El implante consistiría en una estructura portadora de reservas de insulina y de glucosa oxidasa. Conforme se elevara el nivel de glucosa del paciente, la glucosa difundiría hacia esa estructura y reaccionaría con la enzima, generando un producto de carácter ácido. La elevación de la acidez alteraría la permeabilidad del plástico o la solubilidad de la hormona almacenada en su interior, produciéndose una liberación de insulina proporcional a la subida del nivel de glucosa. Un implante de este tipo podría durar toda la vida, aunque habría que recargar los depósitos de glucosa oxidasa y de insulina.

El implante ideal sería el constituido por células de islotes sanos. Y es lo que se pretende con el trasplante de células de islotes. Como sucede con los órganos trasplantables, la demanda de tejido de páncreas humano supera con creces las disponibilidades. De ahí los ensayos sobre el empleo de islotes de animales. Se estudia también la forma de producir tejido glandular a partir de células obtenidas del paciente, un pariente cercano o un banco de células. Las células podrían multiplicarse fuera del organismo para introducirlas luego en el enfermo.

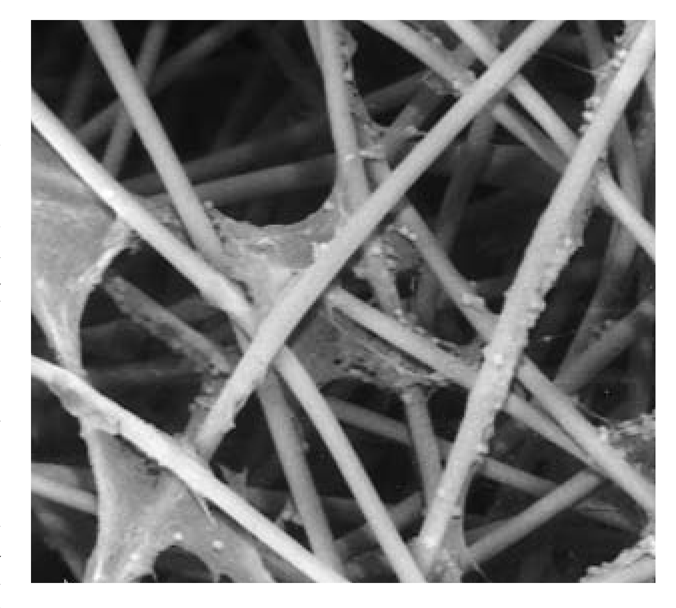
ROBERT LANGER y JOSEPH P. VACANTI trabajan conjuntamente en bioingeniería de tejidos. Aquél enseña en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, éste en la Universidad de Harvard.

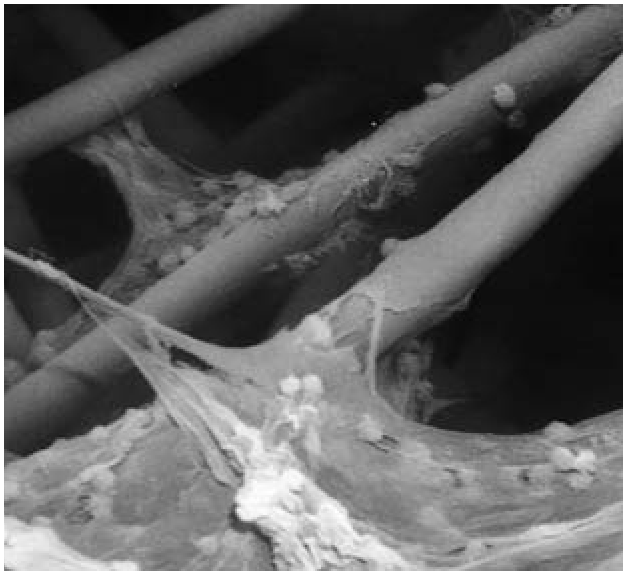
1. LA REPOSICION DE UN BRAZO O DE UNA MANO se conseguirá algún día mediante el desarrollo de tejidos artificiales. La estructura de cada sistema —músculo, hueso, vasos sanguíneos, piel, etc.— quedará asegurada por medio de un soporte de plástico biodegradable. Este "andamio" servirá al mismo tiempo de lecho para la siembra de células de los tejidos a recuperar. Las células se multiplican y el plástico se degrada; al final sólo permanecen los nuevos tejidos cohesionados. Una bomba mecánica se encargará de aportar los nutrientes y retirar el material de desecho hasta que el brazo, que tardaría unas seis semanas en formarse, pudiera implantarse en el cuerpo. Se han alcanzado ya partes importantes de esta técnica. Queda un obstáculo: la regeneración del tejido nervioso. (La representación de un gradiente del desarrollo sólo tiene un propósito ilustrativo; en realidad, todos los tejidos se generan simultáneamente.)

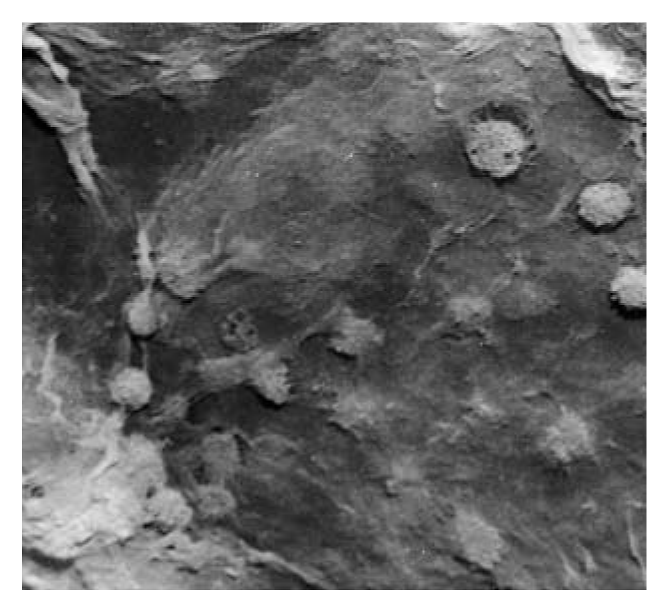


La bioingeniería de los tejidos animales ha apostado por la manipulación de plásticos o biopolímeros de elevado grado de pureza que sirvan de sustratos de cultivos celulares y trasplantes. Estos polímeros poseen una notable resistencia mecánica y, al mismo tiempo, una elevada relación entre superficie y volumen. Muchos de ellos están químicamente emparentados con las suturas degradables que se introdujeron hace una veintena de años. Con la ayuda de programas de diseño asistido por ordenador y nuevos procesos de elaboración, se conseguirá moldear plásticos que sirvan de lecho para que hagan de soporte e imiten la estructura de tejidos específicos e incluso de órganos. Este tipo de andamiaje se someterá a tratamientos con compuestos que faciliten la adhesión y multiplicación de las células sembradas sobre él. A medida que las células se dividan, el plástico irá desapareciendo. Al final sólo permanecerá un tejido cohesionado. El paciente recibirá después el implante del nuevo tejido.

La viabilidad de este enfoque está ya demostrada en el animal: nuestro grupo introdujo válvulas artificiales de corazón en corderos después de construirlas por bioingeniería a partir de células de vasos sanguíneos de animales. En estos últimos años, se ha podido injertar piel humana cultivada sobre sustratos poliméricos para remediar quemaduras o úlceras del pie. La capa epidérmica de la piel puede sufrir rechazo en ciertos casos, pero el problema se resolverá con células de características de donante universal.





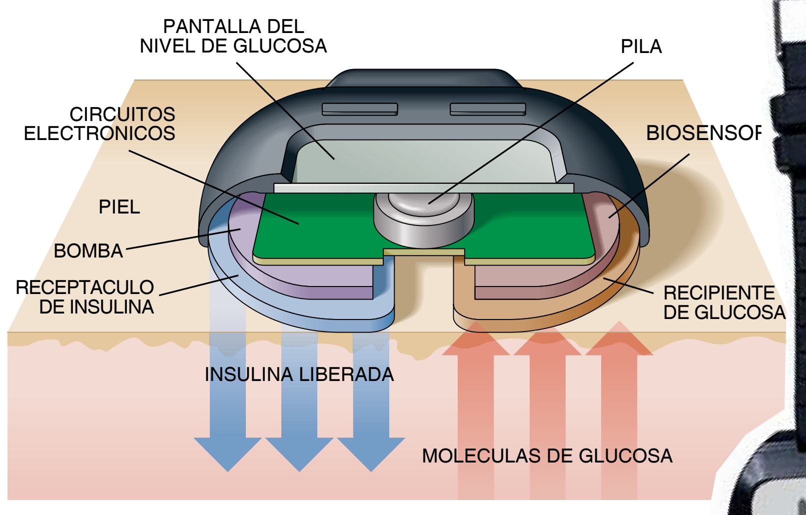


2. EL ANDAMIAJE sirve de molde para la formación del nuevo tejido (de abajo arriba, los aumentos son ×200, ×500, ×1000). El plástico biodegradable está sembrado de células, que al dividirse y asociarse acabarán cubriendo la estructura. El plástico se irá degradando en paralelo al desarrollo de los tejidos que ocuparán los lugares adecuados.

En el futuro acabarán diseñándose órganos completos como el riñón o el hígado, para su transferencia a los pacientes. Aunque pueda parecer utópico forjar un órgano funcional sobre un entramado de polímeros, nuestra experiencia con válvulas de corazón revela la extrema habilidad de las células para organizarse y regenerar el tejido de origen; pueden establecer comunicaciones tridimensionales utilizando las mismas señales extracelulares que guían el desarrollo de los órganos en el útero. Si se dan las condiciones iniciales apropiadas, las células rematarán por sí solas la reconstrucción. Los cirujanos sólo tendrán que ocuparse de establecer las conexiones del órgano en cuestión con los nervios del paciente, sus vasos sanguíneos y canales linfáticos.

El tejido natural conseguido por bioingeniería terminará por ocupar el puesto de las prótesis de metal o de plástico empleadas para reparar lesiones óseas y articulares. Estos implantes vivos se unirán sin costuras con el tejido circundante, eliminando problemas de infecciones o de desgaste que suelen acompañar las prótesis actuales. Podrán generarse estructuras con formas complejas, hechas a medida, como una nariz o una oreja, sembrando, con células de cartílago, matrices plásticas diseñadas por ordenador. Otros tejidos estructurales, desde un uréter hasta el tejido mamario, pueden fabricarse según este mismo principio. Después de una mastectomía, células desarrolladas sobre polímeros biodegradables estarían prestas para reponer la mama.

Por último, con la bioingeniería de tejidos se conseguirá incluso producir miembros complejos: un brazo o una mano, cuya estructura se logra ya con la ayuda de un andamiaje polimérico, y la



3. EL SISTEMA DE INYECCION DE INSULINA tendrá la forma de un reloj. Campos eléctricos o ultrasonidos de baja frecuencia harán que aumente la permeabilidad de la piel, permitiendo así la extracción de glucosa de la sangre. Un sensor hará que la insulina penetre a través de la piel en la circulación en proporción a la cantidad de glucosa detectada.

mayoría de sus tejidos pertinentes —músculo, hueso, cartílago, tendón, ligamentos y piel— crecen en cultivo. Podría diseñarse un biorreactor mecánico que proporcionase nutrientes e intercambio de gases, eliminase productos de desecho y modulase la temperatura mientras maduran los tejidos. Pero antes deberá vencerse la resistencia que opone el tejido nervioso a regenerarse. Nadie ha podido, hasta ahora, desarrollar cultivos de neuronas humanas. Pero son muchos los investigadores que se afanan en ello y confían en alcanzar pronto el resultado deseado.

La introducción de nuevos dispositivos microelectrónicos podría ser una razonable opción alternativa a los implantes del tejido nervioso. La implantación de un microcircuito podrá restaurar algún día la visión de personas ciegas por enfermedad de la retina, la membrana sensorial que tapiza el fondo del ojo. En dos de las enfermedades retinianas más frecuentes, la retinitis pigmentosa y la degeneración de la mácula, están destruidas las células ganglionares de la retina que reciben la luz, aunque permanecen intactos y conservan su función los nervios que transmiten las imágenes desde esas células hasta el cerebro.

Una pastilla ("chip") ultrafina, colocada quirúrgicamente en el fondo del ojo, podría, en conjunción con una minicámara, excitar los nervios que transmiten las imágenes. La cámara estaría equipada con un par de lentes; un láser unido a la cámara llevaría energía al microcircuito y al mismo tiempo le transmitiría la información visual a través de un haz de rayos infrarrojos. El microcircuito excitaría entonces las terminaciones nerviosas de la retina, de manera análoga a como ocurre con las células sanas, produciendo la sensación de la visión. En experimentos con conejos el empleo de ese "microcircuito de la visión" ha demostrado la estimulación de las células ganglionares y la ulterior transmisión de señales hasta el cerebro. Los científicos habrán de aguardar hasta que se haya conseguido implantar el microcircuito al hombre para saber si esas señales producen la sensación real de la visión.

Por el momento, los dispositivos mecánicos seguirán contando en el diseño de órganos artificiales. Continuarán siendo útiles componentes esenciales en la construcción del útero artificial. En los últimos decenios, la ciencia médica ha progresado considerablemente en el cuidado de prematuros. Con las incubadoras actuales se consiguen excelentes recuperaciones de niños nacidos al cabo de 24 semanas de gestación; sus necesidades nutricionales se cubren por vía intravenosa, y los respiradores mecánicos facilitan la actividad pulmonar.

El neonato con menos tiempo de gestación no puede sobrevivir, porque sus pulmones inmaduros son incapaces de respirar el aire. Un útero artificial, lleno de líquido y mantenido en condiciones estériles, mejoraría las tasas de supervivencia de estos prematuros. Los niños respirarían perfluorocarbonos, líquidos que transportan oxígeno y anhídrido carbónico en concentraciones elevadas. Los perfluorocarbonos se inhalan y exhalan como el aire. Una bomba mantendría una circulación continua del líquido, y con ello el intercambio gaseoso. La respiración líquida se asemeja más al medio uterino que los respiradores tradicionales. También están en marcha estudios de ventilación líquida en adultos con lesiones pulmonares. Sistemas de ventilación para infantes se encuentran ya en fase de estudios clínicos. Es muy posible que dentro de una década este tipo de sistemas se aplique también a niños nacidos con períodos de gestación menores aún.

Además de un aparato intercambiador de gases, este útero estaría equipado con filtros que eliminarían las toxinas del líquido. La nutrición seguiría realizándose por vía intravenosa. El útero estaría constituido por un sistema completo en el que el desarrollo y el crecimiento podrían proceder hasta el segundo "nacimiento" del niño. Para la mayoría de los niños prematuros, este sistema les aseguraría la supervivencia. El niño en desarrollo es, después de todo, el bioingeniero por excelencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TISSUE ENGINEERING. Robert Langer y Joseph P. Vacanti en *Science*, volumen 260, págs. 920-926; 14 de mayo de 1993.

DESIGN AND FABRICATION OF BIODEGRADABLE POLYMER DEVICES TO ENGINEER TUBULAR TISSUES. D. J. Mooney, G. Organ, J. Vacanti y R. Langer en *Cell Transplantation*, vol. 3, n.º 2, páginas 203-210; 1994.

ENVISIONING AN ARTIFICIAL RETINA. Wade Roush en *Science*, volumen 268, páginas 637-638; 5 de mayo de 1995.

Los anticonceptivos del futuro

Habrá claros avances en implantaciones, sustancias espermicidas y otros medios contra la fecundación

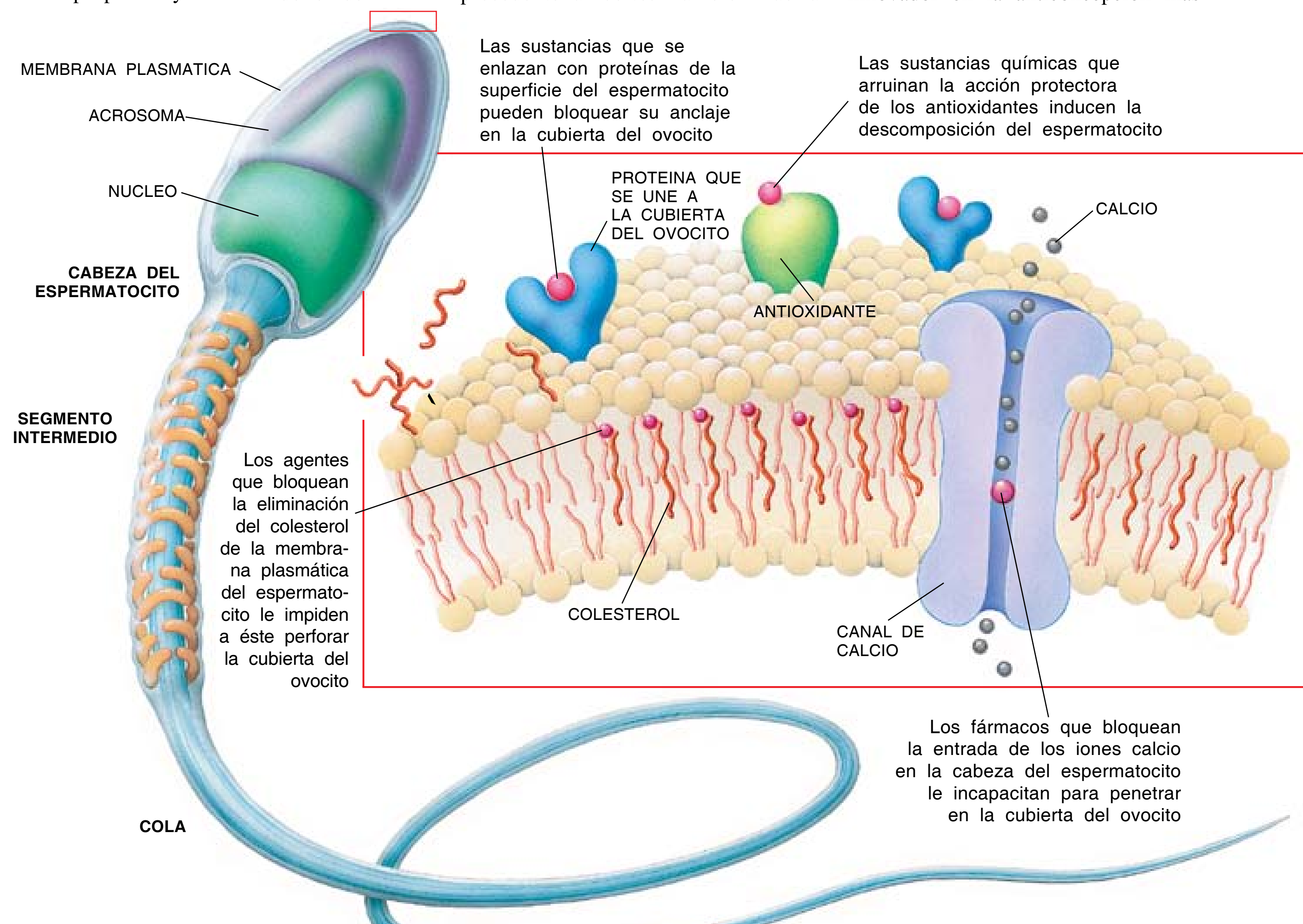
Nancy J. Alexander

Con la gama de anticonceptivos disponibles, ¿se necesitan otros nuevos? Mi opinión es tajante: sí. Entre quienes practican el control de la natalidad (más de la mitad de las parejas del mundo) existe una gran insatisfacción con los métodos actuales, que suele desembocar en el uso inapropiado y el abandono de medidas protectoras, con el crecimiento consiguiente de embarazos no deseados y abortos.

El anticonceptivo ideal debería ser eficaz, seguro, barato, duradero y fácil de anular, exento de efectos colaterales y aplicable en algún otro momento distinto del inmediatamente precedente al coito. También habría de frenar la propagación de las enfermedades de transmisión sexual. Ninguno de los productos en estudio satisface todos esos criterios, pero hay varias propuestas que cumplen la mayoría ellos y podrían estar en el mercado en el primer tercio del siglo XXI.

En el mercado de los anticonceptivos para el varón sólo se ofrece el preservativo. Desde antiguo, los hombres se cubrían el pene con vejigas animales y fragmentos de intestinos. El descubrimiento del látex permitió luego la fabricación uniforme de tales protectores. Ante la opinión extendida de que reducen el placer sexual, los fabricantes comienzan a sustituirlo por otro, fino y resistente, de poliuretano; más tarde aparecerán membranas del mismo polímero o de otros. Además, estos materiales distintos del látex serán excelentes barreras contra infecciones, no provocarán alergias y opondrán mayor resistencia al agrietamiento y la degradación por el calor, la luz y los lubricantes.

Un primer enfoque completamente innovador en la anticoncepción mas-

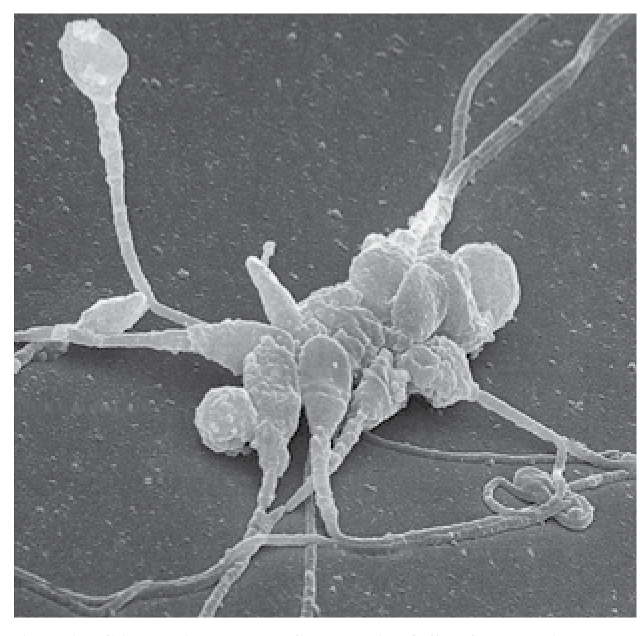


culina se centra en la manipulación de las hormonas que interrumpen la producción de esperma (un reto formidable, si tenemos en cuenta que se generan al menos 1000 espermatozoides por minuto). La producción de esperma está controlada por diversas hormonas. El hipotálamo secreta la hormona liberadora de gonadotropina, que impulsa a la hipófisis a segregar hormona luteinizante y hormona foliculoestimulante. La hormona luteinizante estimula, por su parte, la producción de testosterona en los testículos. Este esteroide, junto con la hormona foliculoestimulante, induce la división en los testículos de las células espermatogonias que formarán el esperma.

Desde un planteamiento endocrino, el anticonceptivo lo constituiría una inyección intramuscular de un andrógeno (testosterona u hormonas masculinas emparentadas) que indujera la liberación de la hormona en el torrente sanguíneo. Esta estrategia, objeto de estudio por parte de la Organización Mundial de la Salud, se apoya en el comportamiento de los andrógenos circulantes, que ordenan al cerebro aminorar la secreción de hormona liberadora de gonadotropinas y, por tanto, de hormona luteinizante y de hormona foliculoestimulante. Ahora bien, la presencia de niveles altos de andrógenos en sangre produce efectos colaterales indeseables: irritabilidad, reducción de los niveles de lipoproteínas de alta densidad —el colesterol "bueno"— y aumento de acné. Parece, sin embargo, que la adición de una progestina (forma sintética del esteroide femenino progesterona) permite tomar una dosis menor de andrógenos, innovación que debería eliminar los efectos secundarios y ser más segura que la administración del andrógeno solo. Ese tratamiento combinado podría otorgar protección para tres meses y hallarse listo para su adquisición dentro de diez años, intervalo por lo demás mínimo para el desarrollo de cualquier técnica anticonceptiva.

Una opción alternativa sería la de bloquear, mediante moléculas sin efectos colaterales relacionados con los andrógenos, la actividad de la hormona liberadora de gonadotropinas. Hay ya antagonistas proteínicos, aunque carentes de suficiente potencia para servir de anticonceptivos. Por eso se está ahondando en el diseño de inhibidores no peptídicos. El bloqueo de la hormona liberadora de gonadotropina suprimiría la producción de testosterona, y eso significa que los varones tendrían que tomar andrógenos de sustitución para conservar la masa muscular, los caracteres sexuales masculinos y la libido.

A más largo plazo, en un cuarto de siglo, podría disponerse de agentes de acción prolongada (protección durante meses) que interrumpieran directamente la producción de esperma en los testículos o impidieran la maduración del esperma en el epidídimo: cámara acompañante conectada a los testículos donde el esperma adquiere su movilidad. Cierta línea de investigación sugiere que la alteración de la maduración espermática en el epidídimo podría ser la opción más factible. Por una doble razón. Primera: cualquiera que sea su forma de administración (vía oral, inyección o implante), los fármacos dirigidos contra el esperma tendrían que alcanzar los testículos o el epidídimo a través del torrente sanguíneo; sin embargo, los medicamentos transportados en la sangre suelen encontrar dificultades para abandonar la circulación y entrar en la parte de los testículos en la que se fabrica el esperma. Además, muchos fármacos que son capaces de atorar la síntesis de esperma han demostrado ser tóxicos para las espermatogonias de los testículos e inducirían, pues, esterilidad irreversible. Tal acción estaría bien para los animales domésticos, pero les resultaría inaceptable a la mayoría de los hombres.



1. LA CABEZA DEL ESPERMATOCITO constituye el blanco de muchas estrategias anticonceptivas. Varios planteamientos (*bloques de texto a la izquierda*) se afanan en el desarrollo de sustancias químicas sintéticas (*puntos rojos en detalle de la membrana plasmática*) que alteren la cabeza del espermatocito, impidiéndole fecundar el ovocito. Se ensayan vacunas anticonceptivas en virtud de las cuales el sistema inmunitario fabrique anticuerpos capaces de alterar la función espermática. Hay anticuerpos que promueven la agregación de los espermatocitos, inutilizándolos (*micrografía*).

NANCY J. ALEXANDER enseña obstetricia y ginecología en la Universidad Georgetown.

El siglo XXI traerá vacunas anticonceptivas (inmunoanticonceptivos) para varones y para mujeres cuya eficacia durará en torno a un año, probablemente. La mayoría inducirá la síntesis inmunitaria de anticuerpos capaces de unirse (para modificar su operación) a proteínas implicadas en la reproducción. Mediante la inyección en el sujeto de muchas copias de la proteína blanco (antígeno o inmunógeno) y otras sustancias capaces de estimular la respuesta del organismo, se activaría el sistema inmunitario.

Una de las vacunas más prometedoras que han llegado a la etapa de ensayos clínicos se propone inducir anticuerpos que inhiban la hormona liberadora de gonadotropinas en los varones. Puesto que esta vacuna cortaría la producción de testosterona, los varones necesitarían, una vez más, terapia de sustitución con andrógenos.

Se están ensayando también dos versiones de una vacuna femenina dirigida contra la gonadotropina coriónica, hormona segregada por la placenta en formación e imprescindible para la implantación. En el Instituto Nacional de Inmunología de la India se ha trabajado en una versión de la misma, sujeta hoy a ensayos de eficacia en humanos. La segunda versión aludida es la que se investiga en el seno de la OMS.

Las vacunas, masculinas o femeninas, podrían inducir respuestas inmunitarias que inmovilizarían los espermatozoides, forzarían su agrupación o impedirían la navegación hasta el ovocito para su acoplamiento con éste. Las vacunas femeninas podrían estimular además la síntesis de anticuerpos que se unirían a la superficie de un ovocito y formarían un escudo impenetrable para el esperma. Los inmunoanticonceptivos tardarán en llegar, por una razón poderosa: hay que estudiar con sumo detalle los inmunógenos que se propongan, cerciorarse de que las inoculaciones no desencadenarán respuestas contra los tejidos que no se pretendía y encontrar métodos de fabricación de vacunas en masa. Y, añadiendo más complejidad, es probable que las vacunas deban contener diversos antígenos para compensar la posible diferente capacidad de respuesta de una persona a otra ante un mismo antígeno.

Mientras el terreno se rotura, las mujeres habrán acumulado ya experiencia con productos nuevos, muchos de ellos hormonales. Cuentan ellas hoy con varios métodos hormonales: anticonceptivos orales, inyección mensual, inyección trimestral y sistema Norplant pentanual; consiste éste en la colocación hipodérmica de seis varillas que contienen hormona. La píldora, razonablemente segura y eficaz, aporta progestinas solas o en combinación con estrógeno sintético. Los inyectables y los implantes son progestinas. En todos los casos, se trata de bloquear la ovulación e incrementar el grosor del moco cervical, que dificulten la movilidad del esperma hacia el ovocito.

Dentro de cinco años habrá un anillo que se adaptará a la vagina, lo mismo que el diafragma, y liberará una progestina sola o con estrógeno. Podría llevarse durante tres semanas y quitarse durante una semana (para permitir la menstruación). Evitaría así la necesidad de tomar una píldora diaria.

También para los próximos años se espera que el fabricante de Norplant introduzca un implante de segunda generación compuesto de dos varillas, más fáciles de insertar y retirar que el prototipo primero. Andando el tiempo habrá implantes de una sola varilla y un sistema biodegradable que acabará disolviéndose en el organismo, pero que será extraíble y, por consiguiente, reversible durante algún tiempo. Existe ya un dispositivo intrauterino liberador de una progestina que dura cinco años; por su parte los DIU no hormonales son eficaces en las mujeres que han estado embarazadas.

Muchos investigadores se están aplicando al desarrollo de una píldora que podría tomarse sólo una vez al mes: en el momento en que se previera la menstruación o el último día del período (para evitar el embarazo durante el mes siguiente). Para ciertas mujeres, esto último sería más deseable, porque, en vez de inducir un aborto precoz, evitaría la concepción. Pero cuesta avanzar en esa línea debido a la falta de conocimiento suficiente sobre los mecanismos que estimulan e interrumpen las hemorragias mensuales.

En algún momento de su vida es probable que una mujer tenga relaciones sexuales sin protección. Ya se

Tratamientos de la esterilidad en el futuro

A lo largo de los diez últimos años se ha progresado bastante en las técnicas de fecundación *in vitro* (el procedimiento que produjo el primer bebé “probeta” en 1978). Puede ya inducirse la ovulación de muchos óvulos en un ciclo menstrual; se extraen los ovocitos y se les inyecta esperma o ADN; tras someter los embriones formados a pruebas de detección selectiva de defectos genéticos, se implantan los sanos en el útero femenino. Técnicas que, en los próximos años, se irán refinando.

La fecundación *in vitro* se aplica, sobre todo, en mujeres cuyas trompas de Falopio están bloqueadas o cuya incapacidad para concebir no acaba de entenderse. Las mujeres estériles como consecuencia de la presencia de tumores fibroides benignos en el útero necesitan otras terapéuticas. Por ahora, los fibroides molestos suelen reducirse mediante cirugía o administrando análogos de la hormona liberadora de gonadotropina. Cualquier cirugía comporta riesgos y el tratamiento hormonal puede ser problemático, en parte porque los análogos impiden la concepción; además, cuando se interrumpe el tratamiento, los fibroides suelen recurrir. Si se logran identificar proteínas exclusivas de la superficie tumoral, podrían diseñarse fármacos que ocuparan el lugar de esas proteínas y curaran los tumores; así de sencillo, sin afectar a los otros tejidos o causar efectos colaterales. Hay buenas posibilidades de que estos fármacos existan de aquí a quince años.

Habrá de emplearse terapias similares para sanar la endometriosis, crecimiento fuera del útero de células endometriales (procedentes del revestimiento uterino). La afección produce cierta esterilidad e induce también intensos calambres menstruales.

Pero se supone que serán los varones (en especial los que no fabrican esperma) quienes saldrán más beneficiados de los avances espectaculares que se avecinan. Se investiga la posibilidad de trasplantar células precursoras de espermatozoides en los túbulos seminíferos de los testículos: el sistema de tubos en los que de ordinario se forma el esperma. En condiciones normales, esas células precursoras generan esperma durante toda la vida del varón; cabe esperar que las células trasplantadas hagan lo propio.

TESTICULOS DE RATON, antes estériles, comenzaron a producir esperma en gran cantidad después de la implantación, cerca de la periferia, de células precursoras extraídas de otro ratón. La estela de color observada en el centro es un signo de que las células trasplantadas, que estaban teñidas de azul, sobrevivieron y produjeron esperma.

venden anticonceptivos poscoitales de urgencia: se trata de la píldora abortiva, que puede tomarse dos o tres días después del coito. Las píldoras anticonceptivas regulares pueden servir también como anticonceptivos de urgencia si se toman en las dosis adecuadas. Todas ellas, sin embargo, producen efectos secundarios, por lo que se está investigando el desarrollo de versiones más suaves. Así, se ha observado que la píldora francesa RU 486, comercializada en varios países y cuyo empleo mejor conocido es la interrupción del embarazo, causa pocas molestias cuando se toma en una dosis baja en las 72 horas posteriores al acto sexual.

Una estrategia anticonceptiva bastante diferente se basará en el desarrollo de sustancias químicas que impidan la migración del espermatozoide hasta el ovocito o la fecundación de éste. Tales compuestos procederían de un anillo vaginal, para protección a largo plazo, o podrían introducirse en la vagina poco antes del coito, igual que se hace con los espermicidas. Diferirían de estos últimos en varios aspectos, sin embargo. Los espermicidas son detergentes que degradan el esperma. Pueden acabar con la microflora que ayuda a mantener la acidez apropiada de la vagina, así como irritar la pared vaginal, facilitando la infección por virus y bacterias. Los compuestos en estudio no serían detergentes y actuarían con mayor especificidad, es decir, entorpeciendo la normal evolución de los episodios subsiguientes a la eyaculación.

Una vez en la vagina, los espermatozoides experimentan cambios importantes, encaminados a la fecundación. Desaparece el colesterol de la membrana que encierra la cabeza del espermatozoide, lo que aumenta la fluidez de aquélla y, por tanto, permite el cambio de posiciones de otras moléculas. Después, con la ayuda de la progesterona de las trompas de Falopio, se abren canales especializados en la membrana espermática, que permiten así el flujo hacia el interior de iones calcio externos. Estos iones facilitan la reacción del "acrosoma" (saco compuesto de enzimas y situado en la cabeza del espermatozoide), que ocurre cuando el espermatozoide se encuentra con la zona pelúcida, cubierta gelatinosa que rodea la membrana externa del ovocito. En la reacción acrosómica, la membrana plasmática del espermatozoide se funde con la del acrosoma, y se liberan enzimas al exterior para que abran paso al espermatozoide en su perforación de la cubierta del óvulo.

Entre los productos químicos que se están explorando para impedir la maduración del esperma y la reacción del acrosoma se cuentan los que obstruyen los canales de calcio o bloquean la salida del colesterol de la membrana plasmática. (Se trabaja en la posible aplicación de estas sustancias al varón: resultarían eficaces si lograran unirse al esperma en el epidídimo y se mantuvieran así en la travesía por el tracto genital femenino.) Otros autores se hallan empeñados en obtener una reacción acrosómica prematura, que dejaría al espermatozoide sin capacidad para fusionarse con el ovocito.

Otras líneas afines de trabajo son las que buscan inhibir las interacciones específicas entre el espermatozoide y la zona pelúcida. En el hospital clínico de la Universidad de Duke se ensaya un compuesto que se une a una proteína espermática (la quinasa receptora de la zona) en el lugar reservado para la interacción con una proteína de la zona pelúcida. El anclaje del compuesto bloquea la acción enzimática en la cubierta del ovocito. Por otro lado, el esperma y el líquido seminal portan enzimas antioxidantes, que protegen la integridad de la membrana espermática; si tales antioxidantes resultaran ser exclusivos del esperma o el líquido seminal, podrían crearse fármacos que inactivaran tales enzimas, sin tener que privar a otras células de las defensas antioxidantes. En determinados casos, anticuerpos puros generados en el laboratorio (anticuerpos monoclonales) podrían ocupar el lugar de sustancias químicas no biológicas entre los ingredientes activos de los anticonceptivos liberados en la vagina.

La creciente propagación de las enfermedades de transmisión sexual insta a buscar la combinación de los efectos anticonceptivos con los antiinfecciosos. Las barreras pueden ser físicas (preservativos masculinos y femeninos y, en cierto grado, el diafragma) o químicas (espermicidas u otras formulaciones más selectivas). Para evitar la infección del virus del sida y otros agentes infecciosos, la barrera química tendría que cubrir, cuando menos, la pared vaginal entera y el cuello del útero, no producir irritaciones ni ser tóxica para la flora vaginal.

Apenas han comenzado los ensayos sobre la eficacia de los espermicidas existentes para evitar la transmisión de las enfermedades venéreas. Se sabe que frenan la infección por *Chlamydia*. Es sólo un caso. En los próximos 10 años podría haber espermicidas de diseño que preservaran la salud de la mujer puesta en peligro cuando fracasa la protección del hombre o ésta no existe.

Los métodos anticonceptivos actuales son el fruto de la investigación iniciada hace años. De aquí al año 2000 podrían agregarse los preservativos de polímeros, los anillos vaginales y los implantes de una o dos varillas de hormona, más fáciles de extraer que las cápsulas actuales. Unos pocos años después, llegarán los espermicidas que disminuirán la propagación de las enfermedades de transmisión sexual. A ellos seguirán nuevos anticonceptivos de urgencia, una combinación inyectable en varones de andrógeno y progestina con una duración de acción de tres meses, implantes biodegradables e inmunoanticonceptivos. Puesto que no existe el anticonceptivo ideal, quienes recurran a ellos necesitan un amplio conjunto de opciones. La investigación abierta dará su pleno rendimiento el siglo venidero.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REGULATION OF MOUSE GAMETE INTERACTION BY SPERM TYROSINE KINASE. L. Leyton y cols. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 89, n.º 24, páginas 11.692-11.695; 15 de diciembre de 1992.

FERTILIZATION POTENTIAL IN VITRO IS CORRELATED WITH HEAD-SPECIFIC MANNOSE-LIGAND RECEPTOR EXPRESSION. ACROSOME STATUS AND MEMBRANE CHOLESTEROL CONTENT. S. Benoff y cols. en *Human Reproduction*, vol. 8, n.º 12, páginas 2155-2166; 1 de diciembre de 1993.

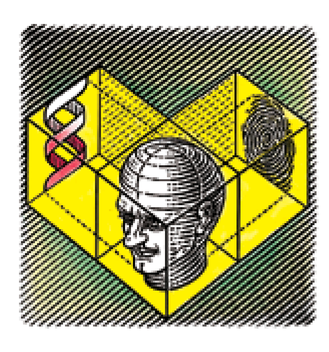
CONTRACEPTIVE VACCINE DEVELOPMENT. N. J. Alexander y G. Bialy en *Reproduction, Fertility and Development*, vol. 6, n.º 3, páginas 273-280; 1994.

SPERMATOGONIAL STEM CELLS OF THE TESTIS. M. Dym en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 91, n.º 24, págs. 11.287-11.289; 22 de noviembre de 1994.

¿Un futuro mejor?

Los progresos de la medicina ponen a prueba las ideas sobre la vida

Arthur Caplan



No es difícil adivinar un futuro en el que la técnica mejore la calidad de vida. Los progresos médicos prometen más salud mediante la terapia intrauterina, la manipulación genética, la construcción de órganos artificiales, el empleo de fármacos de diseño y la aplicación de otras ingeniosas técnicas para restaurar las funciones orgánicas. Tampoco es difícil imaginar que se alargará la esperanza de vida mediante la lucha contra los agentes infecciosos.

A pesar de tan felices expectativas, son muchos hoy los pertenecientes al gremio de la ética que fruncen el ceño. La medicina del mañana quizá nos capacite para vivir más tiempo, pero ¿nos permitirá vivir mejor? Las tendencias demográficas y fiscales, objetan, no auguran sino miseria. A medida que la técnica va salvando y alargando vidas, prosiguen, se va ennegreciendo para nuestros descendientes el porvenir. Al hacerse la medicina más capaz cada vez de eliminar enfermedades peligrosas y de retrasar la muerte, habrán de ir en aumento la explotación de los recursos naturales, la destinación de los económicos a las necesidades sanitarias y la probabilidad de conflictos tanto internacionales como intergeneracionales. La propia miseria de la vejez humana se agravará también a medida que cada vez más de nosotros vayamos llegando a los setenta, ochenta y noventa años... tan sólo para vérnoslas con la artritis, la apoplejía, la enfermedad de Alzheimer o la de Parkinson.

Las previsiones siniestras van todavía más allá. Algunos expertos sostienen que en los países desarrollados se impondrá el factor limitante de la alta tecnología. A otros les preocupa que las pensiones acaben por engullirse el entero producto nacional bruto. A otros, en fin, les aterra la perspectiva de unos seres humanos tan ávidos de prolongar más y más su vida que no vacilen en robar los caudales a sus propios hijos y nietos para pagarse esta dudosísima satisfacción. Aunque estas predicciones revelan graves peligros del progreso de la medicina, tal preocupación puede ser injustificada. Hasta ahora los avances médicos han resultado caros y ambivalentes en punto a moral. Mas la técnica del siglo XXI no tendrá por qué seguir por ese camino.

Pero hay cuestiones que preocupan todavía más que los problemas demográficos y dinerarios. Por ejemplo, si podemos curar las enfermedades mentales alterando la química de nuestros cerebros, ¿no nos exponemos a perder en ese proceso nuestro sentido de la identidad? Si es más eficaz diagnosticar y tratar un trastorno jugueteando con nuestras moléculas, ¿será ya alguien capaz de, o pagado por, hablar con los pacientes? ¿O todo lo que esperemos del personal médico llegará a ser tan sólo la inmediata administración de una droga? ¿Acabará pensando la gente que es irresponsable tener hijos sin haber pasado antes por un exhaustivo examen genético? Según vayamos sabiendo más acerca de cómo los genes regulan el funcionamiento del cuerpo, ¿quién decidirá si características tales como la baja estatura, la calvicie, el albinismo, la sordera, la hiperactividad o la agresividad han de clasificarse como enfermedades y no como meras diferencias? ¿Con qué criterios se harán estas distinciones?

El mismo reduccionismo molecularista que está revolucionando la medicina nos enfrenta también al más grave reto moral. Hemos de decidir hasta qué punto queremos diseñar nuestra descendencia. Al tratar de resolver esta cuestión se nos plantearán problemas sobre la maleabilidad y la perfectibilidad de nuestra especie; ante tamañas dificultades diríase que carecen de importancia las discusiones corrientes sobre la respectiva influencia de la genética y la educación.

¿Será tanta la angustia filosófica como para que debamos poner freno al vertiginoso avance de la terapia génica? ¿Llegará la emergente revolución médica a confundirnos hasta el extremo de que no sepamos ya quiénes somos ni por qué estamos aquí e incluso algún día añoremos tiempos más sencillos en los que los niños morían por enfermedades como la de Tay-Sachs, la anemia falciforme o la fibrosis quística y los adultos eran víctimas del cáncer, la diabetes y las cardiopatías?

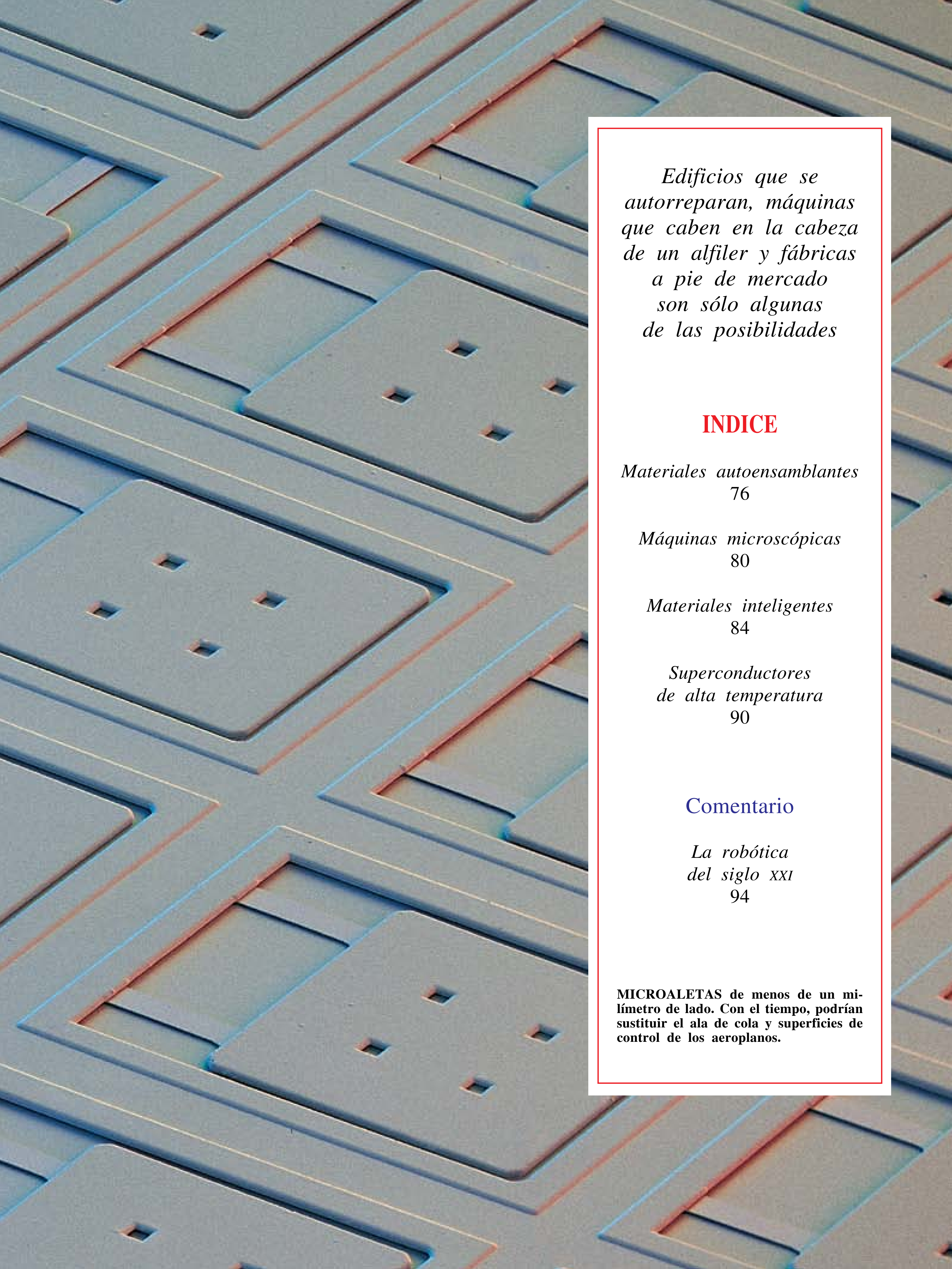
Difícilmente. Si ser humano significa emplear la inteligencia para mejorar la calidad de vida, hay poca base para la ambivalencia ética o la duda respecto a eliminar los azotes genéticos tanto como lo hemos logrado con la polio, la viruela y otras enfermedades contagiosas.

Esta lógica se aplica asimismo a la más tremenda opción a que últimamente nos veremos abocados: la de modificar genéticamente las células germinales. Los cambios en estas células alteran el ADN de quienes reciben la terapia y también el ADN de sus descendientes. La terapia de las células germinales modifica el acervo génico humano, pero los beneficios de eliminar para siempre anomalías tales como la espina bífida, la anencefalia, la hemofilia y la distrofia muscular diríase que hacen obligatoria esa terapia. Nuestro acervo génico lo hemos venido alterando a lo largo de milenios con las guerras, el emparejamiento selectivo, la mejor dieta y la evolución de la medicina. Cambiar los genes de nuestra descendencia de un modo directo, mediante la ingeniería genética, es una diferencia de grado más que de especie de tratamiento. Ahora bien, debemos precavernos mucho contra el mal empleo de la capacidad de diseñar a nuestros descendientes, reglamentándola y legislando sobre ella con cuidado y sometiéndola al consenso de la sociedad.

ARTHUR CAPLAN dirige el centro de estudios bioéticos de la Universidad de Pennsylvania.

MAQUINAS, MATERIALES Y MANUFACTURAS





Edificios que se autorreparan, máquinas que caben en la cabeza de un alfiler y fábricas a pie de mercado son sólo algunas de las posibilidades

INDICE

Comentario

MICROALETAS de menos de un milímetro de lado. Con el tiempo, podrían sustituir el ala de cola y superficies de control de los aeroplanos.

Materiales autoensamblantes

Los procedimientos al uso no permiten construir las complejas máquinas del futuro; éstas deben hacerse a sí mismas

George M. Whitesides

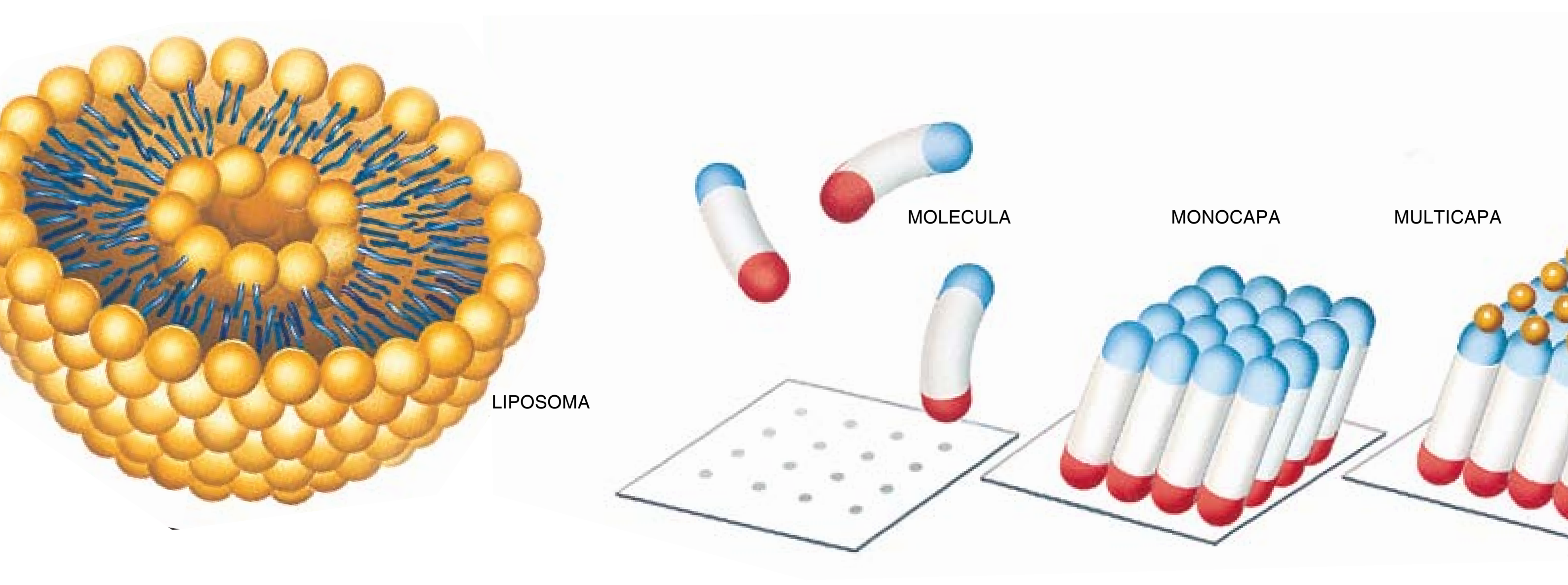
Nuestro mundo está poblado de máquinas, entidades éstas carentes de vida que los humanos ensamblamos a partir de componentes construidos también por nosotros. Estamos más que desbordados por automóviles, ordenadores, teléfonos, hornos de microondas y destornilladores. Pese a tal proliferación, no hay máquina capaz de reproducirse sin el concurso humano. Todavía.

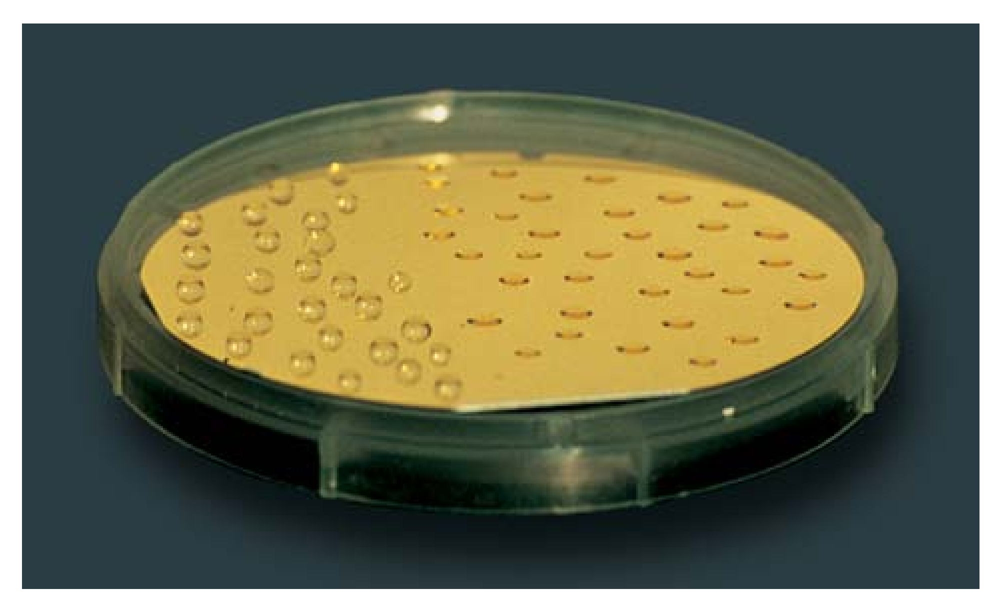
En el siglo XXI, se entronizará una estrategia de fabricación basada en máquinas y materiales que prácticamente se elaborarán solos. Llamada autoensamblaje, es más fácil definirla por lo que no es. En un proceso de autoensamblaje, átomos, moléculas, agregados de moléculas y componentes se organizan por sí mismos en entidades ordenadas y funcionales sin implicación humana. Lo que contrasta con la mayoría de los procedimientos de fabricación actuales, en que interviene la mano humana en grado considerable. Nosotros, o unas máquinas que gobernamos, controlan un número importante de elementos de elaboración o ensamblado. El autoensamblaje suprime las manos humanas de la construcción. Puede que personas diseñen el proceso y puede que personas lo pongan en marcha, pero una vez iniciado un proceso, éste proseguirá de acuerdo con su propio plan interno, sea hacia una forma energéticamente estable o hacia algún sistema cuya forma y función esté codificada en sus partes.

GEORGE M. WHITESIDES enseña química en la Universidad de Harvard.

La idea de autoensamblaje no es nueva. Se inspiró en la naturaleza, donde entidades tan simples como una gota de lluvia o tan complejas como una célula viva surgen de principios físicos o instrucciones implícitos en sus componentes. Además, se está explotando en la manufactura de productos corrientes. Por ejemplo, el cristal de las ventanas suele ser vidrio flotado, que se extrae del horno para solidificarse, a menor temperatura, flotando a través de un baño de metal líquido. Ocurre que el metal tiende a minimizar su superficie haciéndose liso y plano; en consecuencia, el vidrio en contacto con la superficie del metal se hace ópticamente homogéneo y uniformemente plano. Mucho más barato resulta fabricar vidrio flotado que pulir un vidrio obtenido por otro procedimiento, teniendo además el vidrio flotado una superficie de mejor calidad. Tampoco los métodos de fabricación al uso pueden especificar la posición de los átomos de silicio y dopante en un

1. LOS MATERIALES AUTOENSAMBLANTES, tales como el liposoma de la izquierda, están despertando un creciente interés. El liposoma cifra uno de los primeros éxitos de tales materiales: las cápsulas microscópicas destinadas a transportar fármacos se hallan en fase de ensayo clínico. Las investigaciones actuales se centran en las capas autoensamblantes obtenidas a partir de ciertas moléculas. En uno de los extremos de éstas hay un átomo que interactúa fuertemente con una superficie; en el extremo opuesto existen otros agrupamientos atómicos. Las moléculas en cuestión pueden organizarse por sí mismas sobre una superficie, creando así, en su otro extremo, una superficie dotada de unas propiedades diferentes. Se recurre ya a estas monocapas para guiar el crecimiento de células vivas y estudiar la humectación, la adherencia y el rozamiento, así como para formar microestructuras. Sobre la monocapa pueden formarse capas adicionales; multicapas autoensamblantes con las que se está experimentando como recubrimientos para controlar la reflexión en dispositivos de comunicaciones que emplean luz como portador.





2. PARA ESTUDIAR MONOCAPAS AUTOENSAMBLANTES acostumbran emplearse discos de silicio recubiertos de oro. En este experimento la mitad izquierda se revistió con una monocapa dotada de una superficie hidrófoba y la mitad derecha con una monocapa que ofrecía una superficie hidrófila. En la zona hidrófila las gotas de agua se aplastaron, mientras que en la zona hidrófoba formaron perlas que minimizaban la superficie de contacto. Este comportamiento muestra que la parte más externa del monocapa autoensamblante controla la humectabilidad de la superficie.

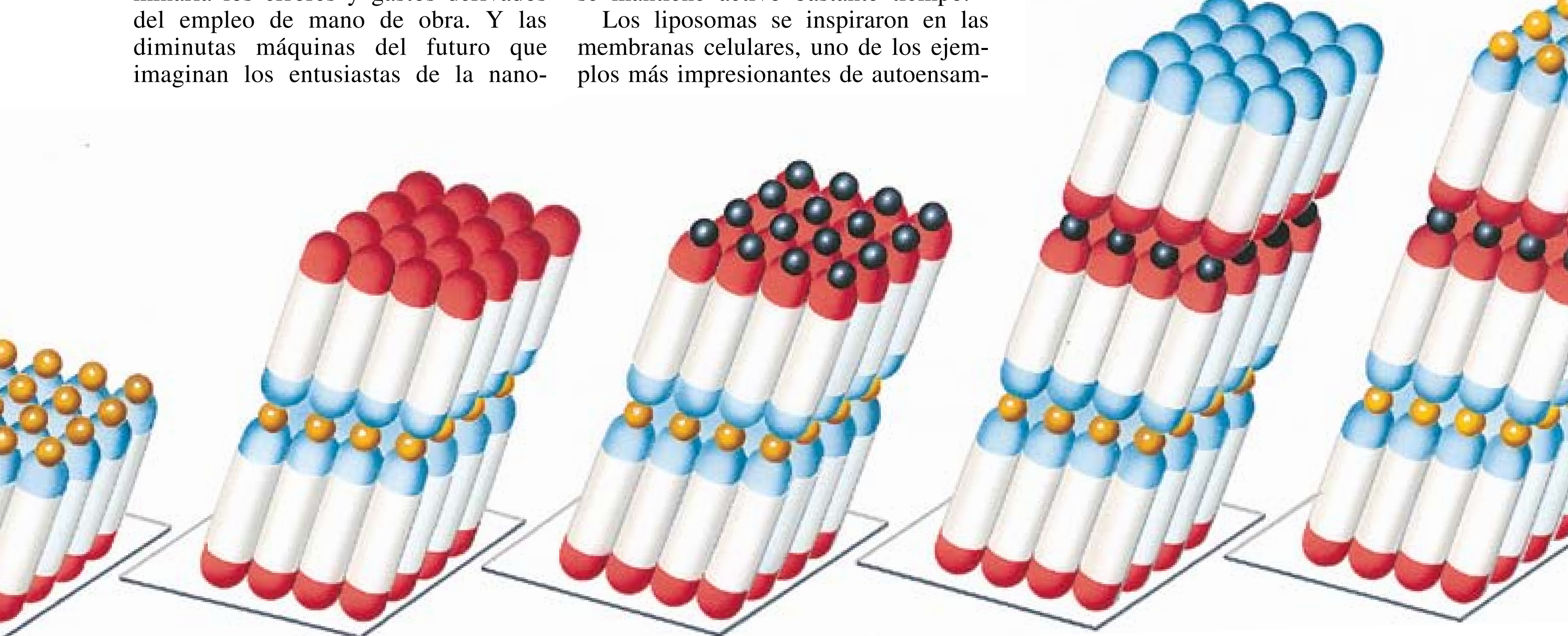
cristal de semiconductor; el crecimiento del cristal a partir de silicio fundido lo dictan los principios termodinámicos.

Ejemplos como éstos ilustran el potencial del autoensamblaje. A tales materiales se llegó casi por accidente. Sin embargo, en los decenios venideros se diseñarán máquinas y sistemas de fabricación que incorporarán los principios del autoensamblaje. El enfoque podría ofrecer numerosas ventajas. Permitiría fabricar materiales con propiedades nuevas y originales. Eliminaría los errores y gastos derivados del empleo de mano de obra. Y las diminutas máquinas del futuro que imaginan los entusiastas de la nanotecnia deberán construirse por métodos de autoensamblaje.

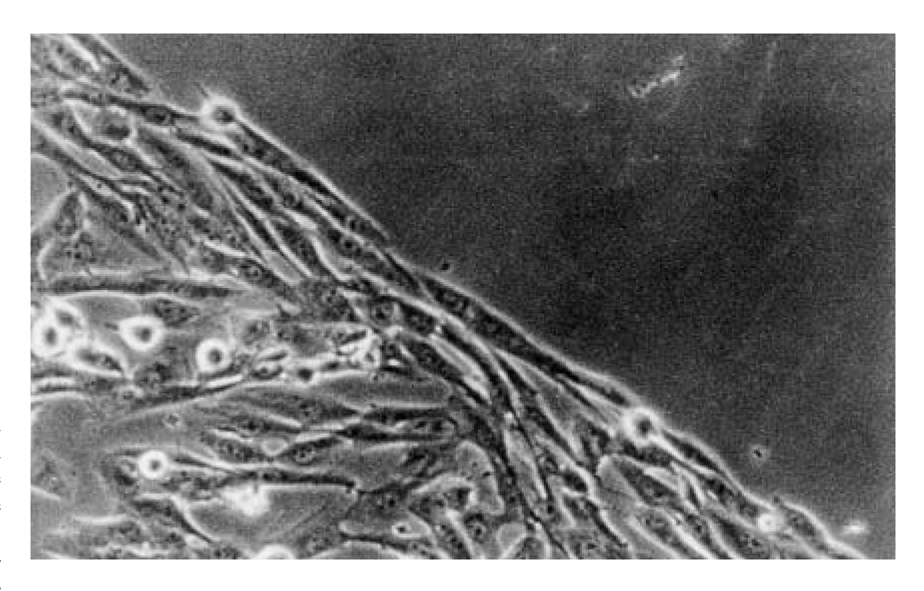
El diseño racional de máquinas autoensamblantes comienza en el diseño racional de materiales autoensamblantes. Entre los primeros logros se cuentan las cápsulas esféricas microscópicas conocidas como liposomas. Desde los años sesenta, se ha venido experimentando con los liposomas para transportar medicamentos por el cuerpo humano; puesto que esas cápsulas protegen su carga de la degradación enzimática, el fármaco que encierran se mantiene activo bastante tiempo.

Los liposomas se inspiraron en las membranas celulares, uno de los ejemplos más impresionantes de autoensamblaje natural. Las membranas celulares constan en su mayor parte de fosfolípidos, moléculas que poseen una personalidad dual: un extremo atrae el agua y el otro extremo la repele. Así, cuando estas moléculas se encuentran en un medio acuoso, espontáneamente forman una capa doble, o bicapa, en que los extremos hidrófilos están en contacto con el agua y los extremos hidrófobos apuntan unos hacia otros. Estos mismos fosfolípidos los emplean los investigadores para hacer liposomas. Si hay bastantes moléculas, la bicapa de fosfolípido crecerá formando una esfera con una cavidad suficiente para albergar moléculas de fármaco. Se inyectan los liposomas en el cuerpo y se libera el fármaco por filtración o por rotura de la esfera. Los sistemas de distribución de fármacos mediante liposomas están en la fase de ensayo clínico.

El ejemplo de la naturaleza orientó la investigación en el campo de los liposomas, pero en otros casos debe empezarse casi de la nada. Un material autoensamblante monocapa (denominado SAM, por quienes trabajan con él) es un prototipo sencillo que ejemplifica el principio de diseño que los investigadores de materiales están explorando. Un SAM es una película de uno a dos nanómetros de espesor, que está formada por moléculas orgánicas que crean un cristal bidimensional sobre un substra-



3. LA CONFIGURACION CELULAR revela la frontera entre dos tipos diferentes de monocapas autoensamblantes. Una parte se ideó para favorecer y la otra para impedir la adherencia de células de mamífero. Se está investigando la capacidad para controlar la fijación de células vivas con el fin de entender la interacción entre células y superficies, sean éstas artificiales o imiten a las existentes en los organismos vivos; también se busca mejorar las prestaciones de los dispositivos destinados a implantarse en el cuerpo humano.



to adsorbente. Las moléculas de un SAM son más largas que anchas. En un extremo hay un átomo o grupo de átomos que interactúan intensamente con la superficie; en el otro extremo, los químicos pueden agregar agrupaciones atómicas, alterando así las propiedades de la nueva superficie formada por el SAM.

El sistema de materiales SAM en que se ha trabajado más se compone de alcanotioles, moléculas con largas cadenas de hidrocarburos que portan un átomo de azufre en un extremo. El azufre se adsorbe bien en substratos de oro o plata. Cuando sumergimos en una solución de alcanotiol una placa de vidrio recubierta de una película fina de oro, los átomos de azufre se fijan al oro. La distancia entre los átomos de azufre adsorbidos en la superficie es aproximadamente

Dos tipos de autoensamblaje



***LAS GOTAS DE LLUVIA** sobre una hoja de árbol ilustran el autoensamblaje termodinámico.*

En la naturaleza abundan los ejemplos de autoensamblaje. Sea la gota de lluvia caída sobre una hoja vegetal. Esa gota posee una superficie curva y suave, exactamente la reclamada por las lentes ópticas. Pulimentar una lente de esa forma sería una empresa ardua; pero el líquido asume tal configuración de manera espontánea, pues las moléculas de la interfase entre líquido y aire son menos estables que las del interior. Las leyes de la termodinámica requieren que una gota de lluvia adquiera la forma que maximice su estabilidad energética, y la forma curva y suave lo consigue minimizando el área de la superficie inestable. Este autoensamblaje termodinámico, así se le conoce, opera sólo para construir las estructuras más simples.

Los organismos vivos representan el extremo de complejidad. También ellos son autoensamblantes: las células se reproducen cada vez que se dividen. La función de una célula está dirigida por moléculas complejas de su interior. Al sustento de las células contribuyen subcomponentes complejos. La organización de la complejidad de una célula la equilibran termodinámicamente estructuras disipadoras de energía en el seno de la célula y requiere moléculas complejas, tales como ATP. Un embrión, una nueva vida en definitiva, puede surgir de la unión de dos células, se ocupen o no de su desarrollo seres humanos.

Este autoensamblaje que materializa la vida se llama codificado porque en sus mismos componentes yacen las instrucciones para el diseño del sistema. La idea de diseñar materiales con un conjunto de instrucciones incorporadas que permitan imitar la complejidad de la vida es inmensamente atractiva.

***UN EMBRION** es ejemplo de autoensamblaje codificado.*

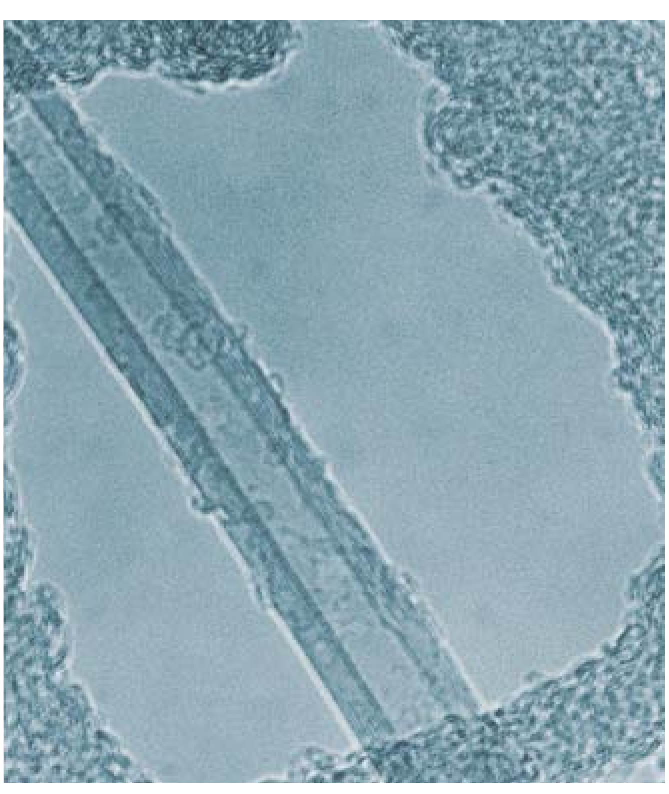


igual al diámetro de la sección transversal del resto de la molécula, y los alcanotioles se aprietan unos contra otros, generando lo que esencialmente es un cristal bidimensional.

Variando la longitud de la cadena hidrocarbonada puede controlarse el espesor del cristal; podemos asimismo modificar con precisión las propiedades de la superficie del cristal: la fijación de distintos grupos en los extremos, por ejemplo, provoca que la superficie atraiga o repela el agua, con la alteración consiguiente de sus características de adherencia, corrosión y lubricación. Si los alcanotioles se estampan en el oro según un patrón determinado, podrán emplearse para investigar el crecimiento de las células en distintos substratos orgánicos o para construir redes de difracción de instrumentos ópticos. Se trata, además, de operaciones sencillas y baratas, que no requieren ni equipos de alto vacío ni litografiado.

El autoensamblaje ha producido minúsculos tubos de grafito que se cuentan entre los "alambres" eléctricos más sutiles jamás fabricados. Nos referimos a los buckytubos, de similar estructura a las buckybolas de carbono, llamadas así por su parecido con las cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller. Los buckytubos se componen de varios cilindros anidados y concéntricos de diámetros nanométricos; al ser de grafito (la forma del carbono más termodinámicamente estable a presión atmosférica), propenden a constituirse bajo condiciones que permitan al carbono desplazarse hacia el equilibrio termodinámico.

En determinado proceso, una gota de metal líquido se expone, a alta temperatura, a una fuente de carbono (benceno, por ejemplo). El carbono se disuelve en una de las caras de la gota y, por razones que aún no se conocen del todo, se precipita en la otra. Al precipitar, forma un tubo circular de grafito cuyo diámetro lo fija el tamaño de la gota metálica. A partir de la gota, el tubo crece sin parar conforme se le alimenta de carbono. Dada la facilidad de preparar soportes para millones de gotas metálicas, pueden producirse en un solo reactor millones de buckytubos. Estos son buenos conductores eléctricos; aunque no se sepa todavía ensamblarlos en estructuras coherentes, los químicos confían en emplearlos como dopantes para aumentar la conductividad de los polímeros y otros materiales no conductores y, algún día, construir con ellos circuitos eléctricos.



4. LOS BUCKYTUBOS están entre los "alambres" más sutiles jamás elaborados. La micrografía electrónica muestra en sección transversal las múltiples capas de grafito que los componen. Estos tubos de tamaños nanométricos son buenos conductores eléctricos y podrían encontrar aplicación como dopantes para aumentar la conductividad de los polímeros y mejorar las prestaciones de las baterías.

Los buckytubos podrían formar parte de un plan más ambicioso relacionado con el autoensamblaje: la memoria cristalina, o versión autoensamblante en tres dimensiones de las memorias planares que hoy se emplean en los dispositivos microelectrónicos. La memoria cristalina reside todavía en el terreno de la especulación, sin que ni uno de sus componentes se haya hecho realidad en los laboratorios. Pero podemos imaginarlos.

La unidad mínima de memoria cristalina podría ser un microcircuito de silicio, o de cualquier otro material semiconductor, capaz de llevar a cabo diversas operaciones microelectrónicas y que portase incrustadas en él instrucciones acerca de cómo comportarse tras su activación por señales procedentes de microcircuitos similares. Esas unidades se agregarían espontáneamente, o cristalizarían, en una unidad de mayor tamaño, a la manera en que los liposomas o los SAM se forman desde componentes menores. En sus nuevas configuraciones, los microcircuitos se estimularían unos a otros y formarían conexiones eléctricas; las señales de esas conexiones activarían entonces las unidades para encauzar las funciones de cada una, de acuerdo con la programación que se les haya incrustado: dispositivos de entrada o de salida, conmutadores, células de memoria, etc.

Si tal dispositivo se le antoja a alguien improbable, recuerde que el proceso recién descrito posee numerosos precedentes en la naturaleza: todas las formas de vida proceden de subunidades simples que se comunican entre sí. Un dispositivo de memoria microelectrónica podría un día ser capaz de construirse a sí mismo merced a la cristalización de porciones más pequeñas, anunciando de ese modo una nueva era en la manufactura.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR SELF-ASSEMBLY AND NANOCHEMISTRY: A CHEMICAL STRATEGY FOR THE SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURES. G. M. Whitesides, J. P. Mathias y C. T. Seto en *Science*, vol. 254, págs. 1312-1319; 1991.

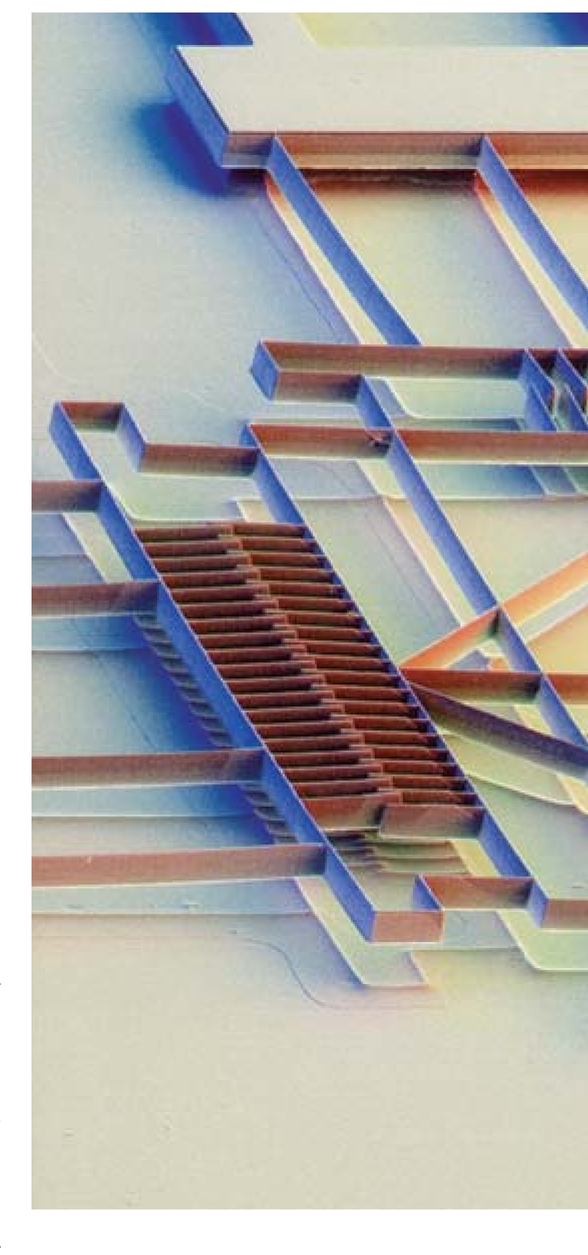
DESIGNING THE MOLECULAR WORLD: CHEMISTRY AT THE FRONTIER. Philip Ball. Princeton University Press, 1994.

ENGINEERING CELL SHAPE AND FUNCTION. R. Singhvi, A. Kumar, G. P. López, G. N. Stephanopoulos, D. I. C. Wang, G. M. Whitesides y D. E. Ingber en *Science*, vol. 264, págs. 696-698; 1994.

Máquinas microscópicas

Los procesos de fabricación electrónicos permiten encerrar en una micropastilla una planta química

Kaigham J. Gabriel



La industria electrónica se basa en su capacidad para multiplicar por dos, cada año y medio, el número de transistores alojados en un microcircuito, tendencia reflejada en la revolución espectacular de la electrónica. La fabricación de millones de elementos microscópicos en una superficie no mayor que un sello de correos comienza ya a impulsar una nueva técnica cuyo alcance trasciende el campo donde se produjeron el teléfono portátil y el ordenador personal.

Con materiales y procesos de la microelectrónica, se han podido crear microscópicos balancines, pozos, engranajes, membranas e incluso motores capaces de mover átomos o abrir y cerrar válvulas para trasegar mililitros de líquido. Las dimensiones de esos elementos mecánicos se miden en micras, unidad del orden de una fracción de la anchura de un cabello humano. Y, como los transistores, es posible fabricarlos por millones de una sola vez.

De aquí a 50 años, esta ingeniería estructural del silicio podría tener en la sociedad una repercusión tan profunda como ha conocido la miniaturización de la electrónica en los últimos decenios. Las calculadoras electrónicas y los circuitos de memoria, con toda su potencia, no hacen sino desviar electrones y encaminarlos por conductores diminutos. Los dispositivos micromecánicos dotarán a los sistemas electrónicos de una ventana al mundo físico, permitiéndoles percibir y controlar el movimiento, la luz, el sonido, el calor y otros agentes.

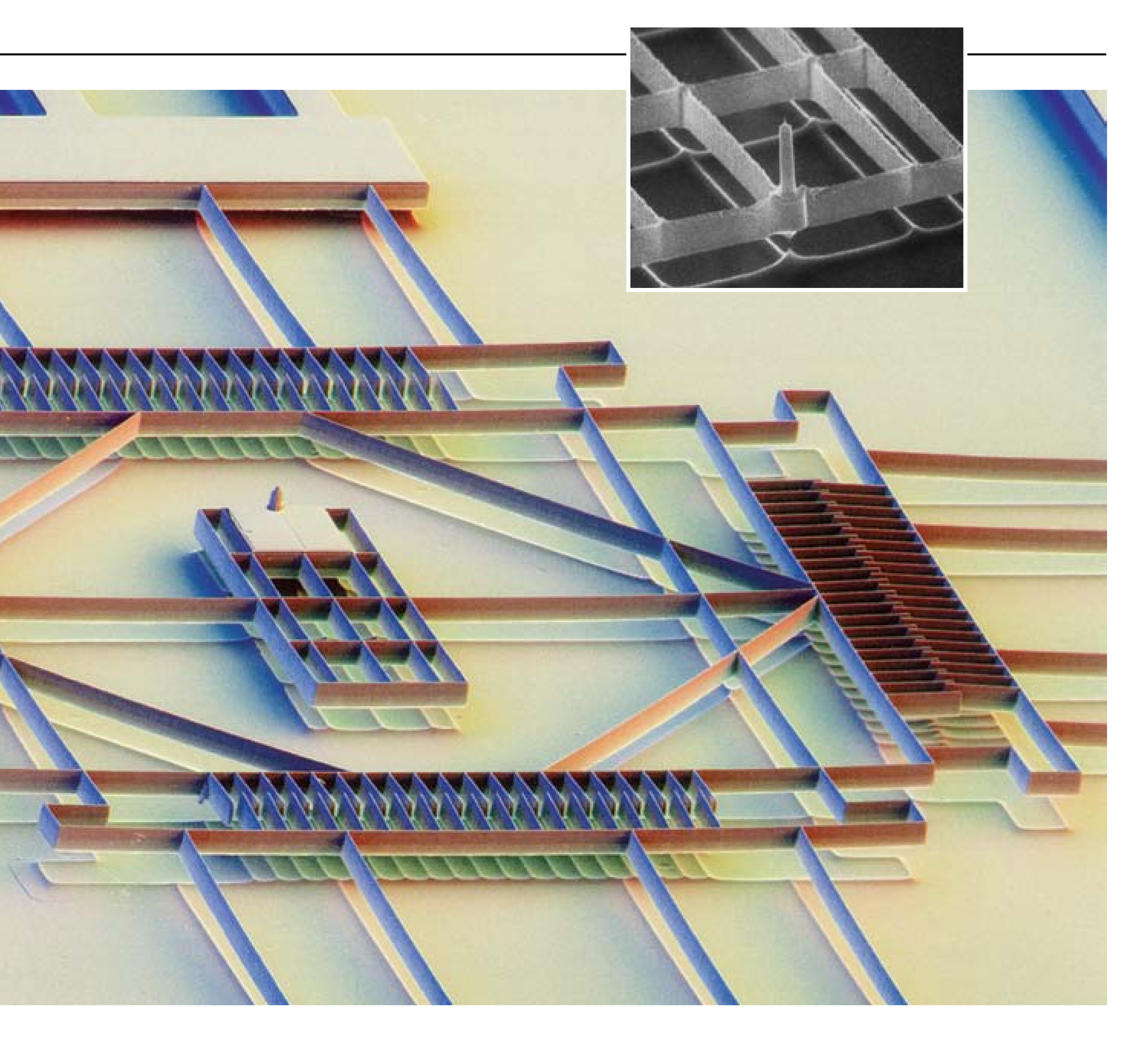
La asociación de sistemas electrónicos y mecánicos generará unos progresos técnicos espectaculares en diversas disciplinas científicas e ingenieriles. Millares de balancines, de unas micras de sección transversal, accionarán minúsculas cabezas de barrido eléctricas que leerán y escribirán datos suficientes para almacenar una pequeña biblioteca de información sobre una superficie del tamaño de un microcircuito. Grupos de válvulas introducirán dosis de fármacos en la corriente sanguínea a intervalos exactamente cronometrados. Sistemas de guiado inercial contenidos en un microcircuito facilitarán la posición de los combatientes y dirigirán con precisión los proyectiles hacia los blancos.

La técnica de fabricar y combinar componentes mecánicos y electrónicos miniaturizados se conoce como técnica MEMS (“Michro Electro Mechanical Systems”). Los dispositivos MEMS se hacen mediante procesos de manufactura similares, y a veces iguales, a los de fabricación de componentes electrónicos.

La técnica de micromecanizado superficial remeda la fabricación electrónica; sólo añade unas cuantas fases de la elaboración de un microcircuito. El micromecanizado superficial debe su nombre a las pequeñas estructuras que “se mecanizan” en la superficie de la oblea, o disco de silicio. Esta técnica se basa en la fotolitografía y en otros elementos básicos de los procesos de manufactura electrónicos destinados a depositar o eliminar, por ataque químico, pequeñas cantidades de material de la pastilla.

La fotolitografía crea un patrón en la superficie de la oblea, enmarcando una zona que luego se elimina por ataque químico para obtener, por ejemplo, un motor o un balancín autoestable. El proceso empieza dibujando y abriendo, por ataque químico, un orificio en una capa de dióxido de silicio depositado sobre la oblea. Luego, mediante una reacción gaseosa, se deposita una capa de silicio policristalino, que cubre orificio y resto del material de dióxido de silicio. El silicio depositado en el orificio se convierte en la base del balancín y el mismo material que reviste el dióxido de

KAIGHAM J. GABRIEL se halla adscrito a la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada del Departamento de Defensa de los Estados Unidos.



1. **UN INSTRUMENTO MICROMECANICO se compone de un motor y una punta, visible ésta en la estructura suspendida en el centro del motor. En el recuadro superior se distingue una punta similar. Algún día estos motores, que miden 200 micras en una de sus dimensiones, podrían accionar puntas que lean y escriban datos.**

silicio forma la parte en voladizo de la estructura de la palanca. En la última fase, se elimina por ataque químico el dióxido de silicio restante, dejando libre y suspendido sobre la superficie de la oblea el balancín de silicio policristalino.

Tales estructuras miniaturizadas exhiben valiosas propiedades mecánicas. Bajo el estímulo de una tensión eléctrica, una varilla (o balancín) de masa reducida vibra más deprisa que otra más pesada, resultando así que será un detector más sensible de movimiento o de presión e incluso de propiedades químicas. El balancín podría adsorber una determinada sustancia química (por adsorción se entiende la adhesión a una superficie de una capa fina de moléculas). Conforme adsorbe más sustancia química, la varilla va cambiando de peso y se altera la frecuencia a la que vibra bajo excitación eléctrica. Por consiguiente, ese sensor químico podría funcionar detectando tales cambios en la frecuencia de vibración. Otro tipo de sensor que emplea varillas obtenidas por micromecanizado se basa en un principio algo diferente. Simplemente hace que varíe la separación entre dos varillas suspendidas que constituyen las placas de un condensador (y altera así la cantidad de carga eléctrica almacenada) cuando un automóvil sufre la brusca desaceleración de un choque. Analog Devices manufactura sensores de ese tipo para disparar sacos de aire.

Ese sensor para sacos de aire podría convertirse en el equivalente microelectromecánico de los primeros microcircuitos electrónicos integrados. La producción de balancines y otros elementos de la superficie de una micropastilla de silicio ha introducido

ese dispositivo en la línea de fabricación de circuitos integrados.

En microelectrónica la capacidad para incrementar el número de transistores que pueden conectarse unos a otros ha generado unos avances revolucionarios. Nos referimos a los microcircuitos de microprocesadores y memorias que han traído instrumentos de cálculo pequeños y baratos tales como el ordenador personal. Pero la valía del MEMS no se patentizará hasta que no se integren con elementos electrónicos millares o millones de estructuras mecánicas.

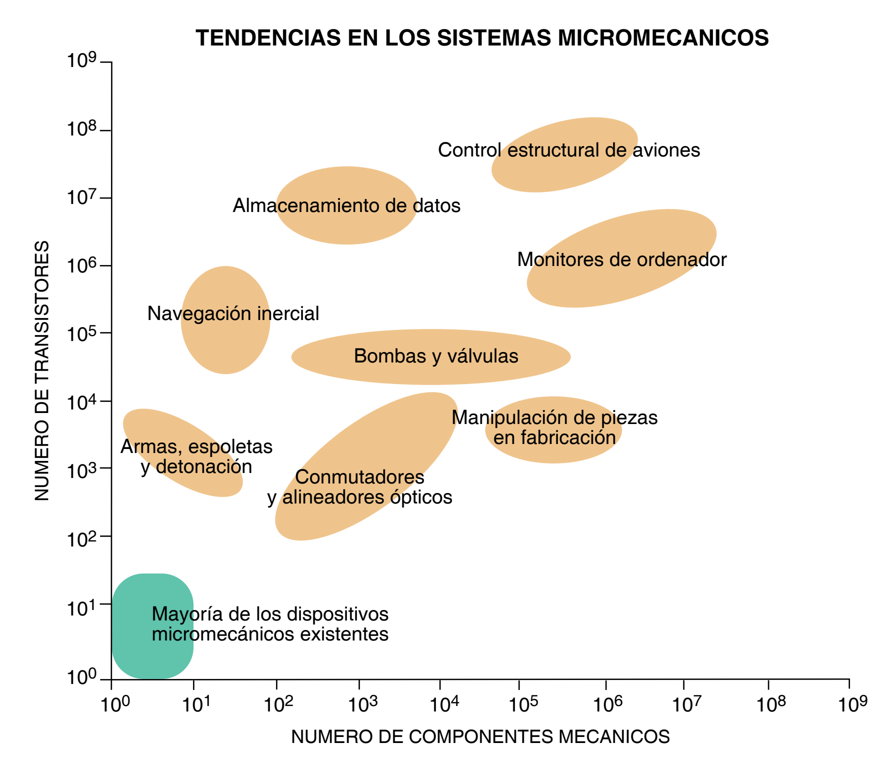
Ya han comenzado a aparecer los primeros ejemplos de producción en masa de dispositivos microelectromecánicos. Texas Instruments ha construido un monitor electrónico en el que los elementos de imagen, o píxeles, están controlados por estructuras microelectromecánicas. Cada píxel consiste en un espejo de aluminio, de 16 micras de ancho, que refleja pulsos de luz coloreada sobre una pantalla. Los píxeles se encienden o apagan cuando un campo eléctrico inclina los espejos 10 grados, en uno u otro sentido. En un sentido, un haz luminoso se refleja hacia la pantalla e ilumina el píxel; en el otro, el haz luminoso se difunde desde la pantalla y el píxel queda a oscuras. Este monitor de microespejos podría proyectar las imágenes requeridas para una televisión de pantalla grande con una luminosidad y resolución notables. Los espejos podrían compensar las limitaciones de otras técnicas. No resulta fácil, por ejemplo, construir pantallas de cristal líquido de tamaño adecuado para una televisión mural.

Podemos vislumbrar el futuro del MEMS examinando los proyectos que durante los tres últimos años financió el Departamento de Defensa de EE. UU. Esa investigación se orienta a la construcción de prototipos de dispositivos y sistemas microelectromecánicos que podrían transformar no sólo los sistemas de armas, sino también los productos de consumo.

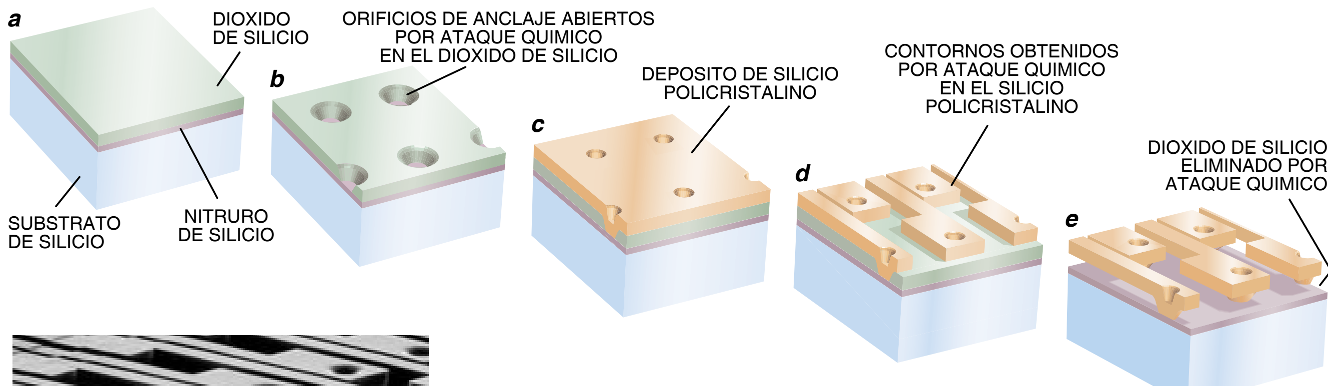
En la Universidad de California en Los Angeles y en el Instituto de Tecnología de California hay un equipo de ingenieros que estudia la posible influencia del MEMS en el diseño aerodinámico. Investigan una técnica que podría reemplazar las extensas superficies móviles de un ala (flaps, aletas auxiliares, alerones) que controlan los giros y los ascensos y descensos. Su plan es forrar la superficie del ala con millares de placas de 150 micras de largo que, en su posición de descanso, permanezcan aplanadas sobre la superficie del ala. Cuando se aplica una tensión eléctrica, las placas se alzan hasta un ángulo de 90 grados. Activadas de ese modo, las placas podrían controlar los vórtices de aire que se forman en determinadas zonas del ala. Unos sensores pueden controlar las corrientes de aire que discurren por encima del ala y enviar una señal que ajuste la posición de las placas.

Esas placas móviles, o actuadores, funcionan de forma similar a una versión microscópica de los flaps de los aviones. El ajuste fino del control de las superficies alares permitiría que el avión virase más rápidamente, se estabilizara en las turbulencias o consumiera menos combustible gracias a un mayor rendimiento de vuelo. El control aerodinámico adicional logrado con ese "forro inteligente" podría desembocar en unos diseños aeronáuticos nuevos que vayan más allá del aspecto de cilindro-con-alas prevaleciente durante 70 años. Los ingenieros aerospaciales podrían olvidarse de flaps, timones e incluso del estabilizador vertical. El avión se convertiría en una especie de "ala volante". Un avión sin estabilizador vertical gozaría de mayor maniobrabilidad, una bendición para los aviones de caza y comerciales.

El diseño de máquinas y sensores de pequeño tamaño abre nuevas aplicaciones a ideas ya encanecidas. Durante un decenio se ha venido trabajando con los microscopios de barrido que manipulan y forman imágenes de átomos. De esos instrumentos, el más conocido es el microscopio de efecto túnel, o MET, inventado por Gerd Binning y Heinrich Rohrer. El MET captó la atención de los especialistas en micromecánica a comienzos de los años ochenta. A los ingenieros les fascinó la cantidad de información que podría almacenarse si los MET se emplearan para leer y escribir datos digitales. Desplegando un conjunto de múltiples MET, en un centímetro cuadrado de un microcircuito podrían encajar un billón de bits de informa-



2. LA EVOLUCION DE LAS MAQUINAS y sensores de pequeño tamaño pone de manifiesto que su integración con circuitos electrónicos permitirá una nueva aproximación al mundo del movimiento, el sonido, el calor y otros agentes físicos. En ordenadas se muestra la capacidad de proceso de información; en abscisas se indica la capacidad de los dispositivos para percibir y controlar. La superficie verde representa dispositivos ya desarrollados; las superficies naranja destacan las aplicaciones futuras de esta técnica.





3. LOS BALANCINES, O VARILLAS, que son piezas de un sensor de aceleración para disparar sacos de aire (*fotografía*), se crean depositando primero capas de nitruro de silicio (material aislante) y dióxido de silicio sobre la superficie de un substrato de silicio (*a*). Los puntos de anclaje de los balancines se obtienen dibujando por litografía los orificios y abriendo éstos por ataque químico sobre el dióxido de silicio (*b*). Se deposita una capa de silicio policristalino (*c*). El contorno de las piezas se consigue por litografía y ataque químico (*d*). Se elimina el dióxido de silicio y las piezas quedan sueltas (*e*).

ción, lo equivalente al texto de 500 ejemplares de la Enciclopedia Británica entera.

El MET es una sonda acicular cuya punta consta de un solo átomo. Una corriente que "abra un túnel" desde la punta hasta una superficie conductora cercana puede mover pequeños grupos de átomos, sea para crear agujeros, sea para producir minúsculos montoncitos en la pastilla de silicio. Esos agujeros y montones corresponden a los ceros y unos necesarios para almacenar datos digitales. Un sensor, construido quizás a partir de un tipo distinto de microscopio de barrido, "leería" los datos detectando si una zona nanométrica de silicio representa un cero o un uno.

Sólo varillas y motores de pocas micras, y masa proporcionada a ese tamaño, serán capaces de mover un MET con la rapidez y precisión suficientes para hacer practicable el almacenamiento de datos en cantidades de terabits (billones de bits). Con los MEMS, de varillas móviles construidas en la superficie de una pastilla podrían suspenderse millares de MET, cada uno de los cuales leería o escribiría datos en una superficie de pocas micras cuadradas. El medio de almacenamiento, además, podría permanecer inmóvil, lo que ahorraría las actuales unidades de disco giratorio.

Noel C. MacDonald ha dado un paso hacia la consecución de la biblioteca de investigación de bolsillo. Ha construido una microvarilla equipada con MET que puede desplazarse tanto según el eje vertical como el horizontal e incluso según un ángulo oblicuo. Su balancín está sujeto a un armazón suspendido y unido a cuatro motores, cada uno de los cuales mide sólo 200 micras a lo ancho. Esos motores empujan o tiran en cada costado de la punta a velocidades de un millón de veces por segundo.

La infraestructura liliputiense que proporciona la técnica MEM podría permitir a químicos y biólogos realizar sus experimentos con instrumentos que quepan en la palma de la mano. El Centro de Ciencias y Tecnología de Westinghouse se propone reducir un espectrómetro de bancada de 22 kilogramos, que se emplea para medir las masas de átomos y moléculas, al tamaño de una calculadora. Ese espectrómetro de masas miniaturizado presagia una era de detectores químicos baratos para controles tóxicos de uso personal.

En esa misma onda, Richard M. White contempla la posibilidad de concentrar una planta química en una pastilla. Ha comenzado formando pozos de diámetro milimétrico en una pastilla de silicio, cada uno de los cuales contiene un compuesto químico diferente. Sometidos a tensión eléctrica, líquidos o polvos caen de los pozos a una cámara de reacción a través de una serie de canales. Los reactivos se impulsan mediante microbombas construidas con materiales piezoeléctricos que estrechan e inmediatamente relajan tramos del canal. Tales ondulaciones serpentean creando un movimiento de bombeo. Una vez que los compuestos químicos se encuentran en la cámara, una placa de caldeo provoca la reacción, y un canal de descarga expulsa al exterior los productos de la reacción.

Una planta química del tamaño de una calculadora podría así servir para hidratar medicamentos liofilizados, realizar pruebas de ADN para detectar patógenos en aguas supuestamente contaminadas o para mezclar compuestos químicos que puedan transformase en energía eléctrica con un rendimiento superior al de las baterías clásicas. La técnica MEMS ofrece a la microelectrónica un nuevo mundo. Ya no volverán a ser lo mismo los automóviles, los laboratorios, los televisores, los aviones y ni siquiera los botiquines domésticos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SILICON AS A MECHANICAL MATERIAL. Kurt Petersen en *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, n.º 5, páginas 420-457; mayo de 1982.

DISPOSITIVOS MICROMECÁNICOS DE SILICIO. James B. Angell; Stephen C. Terry y Philip W. Barth en *Investigación y Ciencia*, págs. 20-33, junio de 1983.

FABRICATION TECHNOLOGY FOR AN INTEGRATED SURFACE-MICROMACHINED SENSOR. Theresa A. Core et al. en *Solid-State Technology*, volumen 36, n.º 10, págs. 39-47; octubre de 1993.

Materiales inteligentes

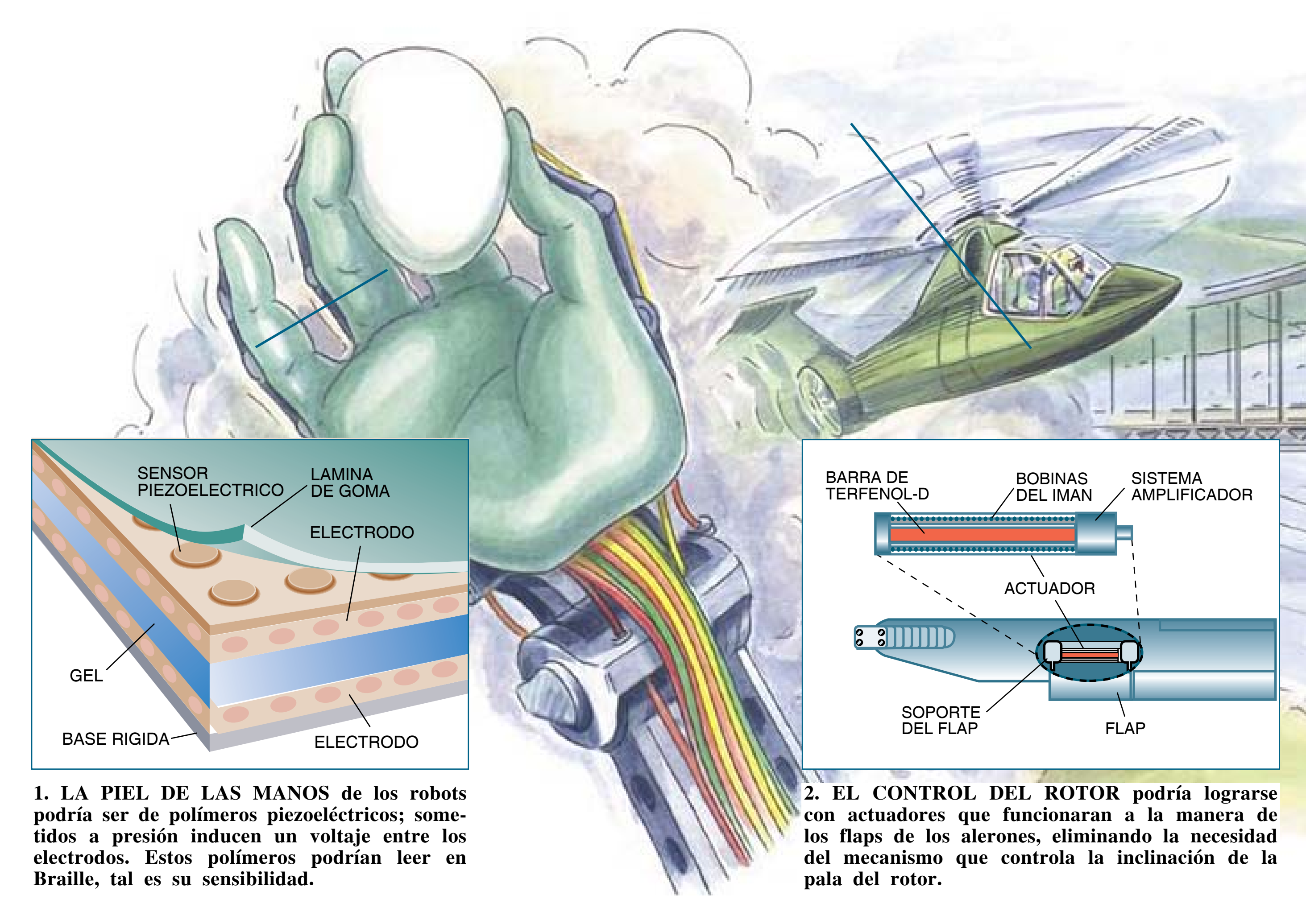
Inspirados en la naturaleza, los investigadores están creando sustancias que pueden prevenir los fallos, recomponerse por sí mismas y adaptarse al entorno

Craig A. Rogers

Imagínese, por un momento, que puertas, suelo o techo emitieran sonidos musicales, que una escalera de mano se quejara del exceso de peso, que los edificios y puentes se reforzaran, solos, durante los terremotos y sellaran las grietas por sí mismos. Diríamos que estos sistemas habrían cobrado vida, pues podían alterar sus estructuras, dar razón de los daños, efectuar reparaciones y retirarse en la vejez.

Quizá no vivamos para ver tales estructuras. Pero demostrado está que esos materiales "vivos" son factibles. Los alquimistas modernos enumeran un surtido de dispositivos para animar la materia inerte: actuadores y motores que operan como músculos; sensores que hacen las veces de nervios y memoria; y comunicaciones y redes computacionales que reemplazan al cerebro y la médula espinal. En ciertos aspectos, estos sistemas gozan de propiedades superiores a las funciones biológicas: sustancias hay que pueden ser duras y fuertes en un momento dado y comportarse como si fueran de gelatina poco más tarde.

Los materiales inteligentes poseen ventajas sustanciales sobre las obras de ingeniería tradicionales. El ingeniero avezado siempre se pone en el peor de los casos. Su proyecto contendrá siempre amplios márgenes de seguridad: refuerzos, redundancias o masas de más. Ese talante reclama más recursos naturales de los que en principio se necesitan, y se consume más energía para producir y mantener una estructura. También se invierte más en predecir las circunstancias bajo las cuales trabajará la obra proyectada y los ataques que sufrirá. Pero, lo vemos a



1. LA PIEL DE LAS MANOS de los robots podría ser de polímeros piezoeléctricos; sometidos a presión inducen un voltaje entre los electrodos. Estos polímeros podrían leer en Braille, tal es su sensibilidad.

2. EL CONTROL DEL ROTOR podría lograrse con actuadores que funcionaran a la manera de los flaps de los alerones, eliminando la necesidad del mecanismo que controla la inclinación de la pala del rotor.

CRAIG A. ROGERS es el director del Centro de Sistemas y Estructuras de Materiales Inteligentes del Instituto Politécnico de Virginia.

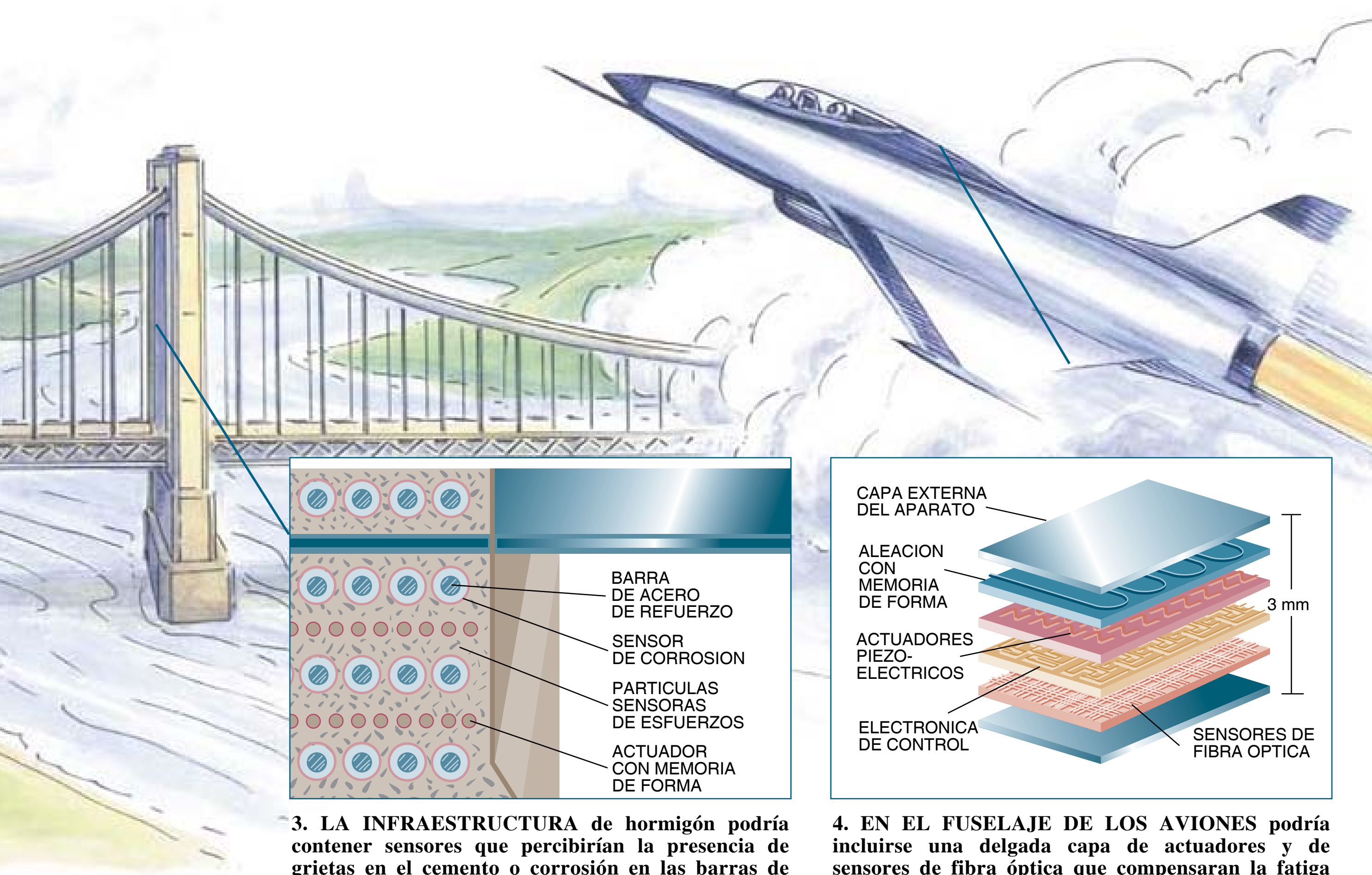
diario, resulta imposible predecir todas las contingencias.

Los sistemas de materiales inteligentes evitarían la mayoría de estos problemas. Fabricados con un propósito específico, serían capaces de modificar su comportamiento ante circunstancias extremas. Así, una escalera de mano sobrecargada podría usar energía eléctrica para reforzarse y advertir del problema al usuario. La respuesta a la sobrecarga estaría basada en la experiencia real de la vida de la escalera, para contrarrestar el deterioro o el paso de los años. La escalera evaluaría su actual estado de salud; cuando no pudiera llevar a cabo ni siquiera pequeñas tareas, anunciaría su retiro. En cierta medida, la escalera se parece al hueso vivo, que se reacomoda según la carga. Pero, a diferencia de éste, que tarda minutos en responder al impulso y se demora meses en completar su desarrollo, la escalera inteligente necesita cambiar en menos de un segundo.

Los materiales que permiten la adaptación de las estructuras a su entorno reciben el nombre de actuadores. Cambian su configuración, rigidez, posición, frecuencia natural y otras propiedades mecánicas en respuesta a la temperatura o campos electromagnéticos. Los materiales actuadores se reducen a cuatro principales: las aleaciones con memoria de forma, las cerámicas piezoeléctricas, los materiales magnetostrictivos y los fluidos electrorreológicos y magnetorreológicos. Aunque ninguna de esas categorías pueden considerarse músculos artificiales perfectos, cada una de ellas, sin embargo, satisface requerimientos específicos de muchas tareas.

Las aleaciones con memoria de forma son metales que, tras sufrir una tensión, retornan a su configuración original al alcanzar cierta temperatura. En el proceso de regresar a la forma "memorizada", las aleaciones pueden generar una notable fuerza útil para una activación. Destacan entre ellas la familia de aleaciones de níquel-titanio producidas en laboratorios de la Marina estadounidense. El material, llamado Nitinol (Ni de níquel, Ti de titanio y nol por las siglas del centro donde so obtuvo), presenta resistencia a la corrosión y a la fatiga; se recupera bien de grandes deformaciones sufridas. Con el calentamiento —mediante una corriente eléctrica— se neutralizan esfuerzos que deforman la aleación hasta el 8 por ciento de su longitud.

Los ingenieros japoneses usan el Nitinol en micromanipuladores y en actuadores robóticos para reproducir los movimientos suaves de los músculos humanos. La fuerza controlada que ejerce el Nitinol cuando recupera su forma permite a estos dispositivos agarrar vasos de papel llenos de agua. También se usan cables de Nitinol implantados en materiales compuestos para modificar sus características vibracionales. Eso



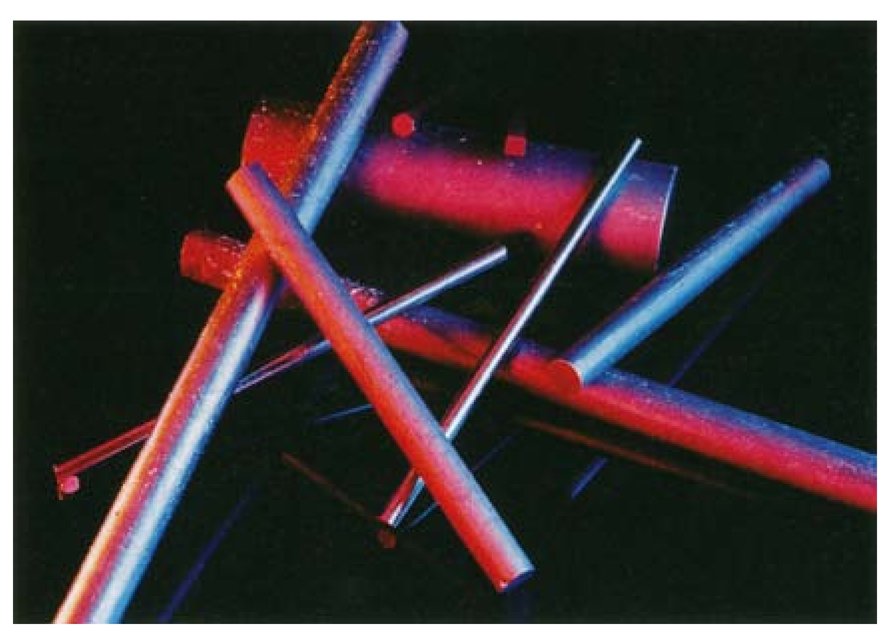
3. LA INFRAESTRUCTURA de hormigón podría contener sensores que percibirían la presencia de grietas en el cemento o corrosión en las barras de acero de refuerzo. Los actuadores con memoria de forma contrarrestarían la fatiga.

4. EN EL FUSELAJE DE LOS AVIONES podría incluirse una delgada capa de actuadores y de sensores de fibra óptica que compensaran la fatiga y mantuvieran la vigilancia sobre sutiles cambios físicos y químicos que presagian un fallo.

se consigue alterando la rigidez o el estado de fatigas en la estructura, con lo que se modifica la frecuencia natural del compuesto; resulta así poco probable que la estructura resuene con alguna vibración externa, un proceso capaz de desmoronar un puente, como ha demostrado la experiencia. Los implantes de Nitinol pueden aplicar una compresión compensadora que reduce el esfuerzo en una estructura. Otras aplicaciones para estos actuadores abarcan las monturas de motores y las suspensiones que controlan las vibraciones. La limitación principal de las aleaciones con memoria de forma estriba en su lentitud de cambio. Como la actuación depende del calentamiento y del enfriamiento, responden al compás de la velocidad con que varía la temperatura.

Una segunda clase de actuadores, que resuelven el problema de la lentitud de las aleaciones con memoria de forma, son los basados en piezoeléctricos. Este tipo de material, descubierto en 1880 por Pierre y Jacques Curie, se expande y se contrae en reacción a un voltaje aplicado. Los dispositivos piezoeléctricos no ejercen la fuerza poderosa de las aleaciones con memoria de forma; los mejores sólo recobran esfuerzos de menos del 1 por ciento. Pero actúan en milésimas de segundo. Por eso son imprescindibles para activaciones precisas y veloces. Gracias a los piezoeléctricos funcionan los dispositivos de seguimiento óptico, los cabezales magnéticos y los sistemas ópticos adaptables de los robots, las impresoras de chorro y los altavoces. El espécimen más usado es el titanato zirconato de plomo (PZT). Se trabaja ahora en el uso de actuadores PZT para atenuar el sonido, amortiguar vibraciones estructurales y controlar los esfuerzos. En el Instituto Politécnico de Virginia se han empleado actuadores en juntas pegadas para resistir la tensión cerca de los lugares que soportan una elevada concentración de fatigas. En los experimentos se alargó la duración por fatiga de algunos componentes en más de un orden de magnitud.

Una tercera familia de actuadores es la derivada de los materiales magnetostrictivos, que sólo se distinguen del grupo de los piezoeléctricos porque responden a campos magnéticos. Los dominios magnéticos de la sustancia rotan hasta alinearse con un campo externo. De esta manera, los dominios pueden dilatar el material. El Terfenol-D, que contiene terbio —una tierra rara—, se expande en más de un 0,1 por ciento. Este material se ha usado en aplicaciones de baja frecuencia y elevada potencia: transductores de sonar, motores y actuadores. Al igual que con el Nitinol, se investiga el empleo de Terfenol-D para la amortiguación activa de vibraciones.



5. LOS MATERIALES MAGNETOSTRICTIVOS, como estas barras de Terfenol-D de varios centímetros de largo, cambian de longitud en un campo magnético. Desarrollada inicialmente para incorporarla en el sonar militar, la aleación se emplea ahora en actuadores, controladores de vibración y sensores.

La cuarta clase de actuadores para sistemas inteligentes la constituyen los fluidos electrorreológicos y magnetoreológicos. Estos líquidos contienen partículas de tamaño micrométrico que forman cadenas cuando se someten a un campo eléctrico o magnético, de lo que resulta un aumento en la viscosidad de hasta varios órdenes de magnitud en milisegundos. Se les ha encontrado aplicaciones en atenuadores sintonizables, sistemas de aislamiento de vibraciones, juntas para brazos robóticos, y dispositivos de fricción como embragues, frenos y controles de resistencia en equipos de maniobras. Aun así, varias maldiciones pesan sobre estos fluidos, como la abrasividad o la inestabilidad química. La investigación reciente para mejorarlos se encauza hacia las sustancias magnéticas.

Los sensores, que describen el estado físico del sistema de materiales, suministran información a los actuadores. Los avances de la micromecanización han provocado un raudal de dispositivos electrónicos que pueden servir de sensores. Me centraré en dos tipos ya bien desarrollados y que son los que con mayor probabilidad se incorporarán en los sistemas inteligentes: la fibra óptica y los materiales piezoeléctricos.

Las fibras ópticas implantadas en un material "inteligente" aportan datos de dos maneras. Primera: pueden suministrar una iluminación constante a un sensor; la interrupción de la luz denuncia la rotura de la fibra por un defecto estructural. Segunda y más sutil: se revela en la intensidad, la fase, la polarización u otra cualidad de la luz por el estilo. En la NASA y otros centros de investigación se recurre a sistemas de fibra óptica para medir la fatiga de los materiales compuestos. Con sensores de fibra óptica también se puede medir el campo magnético, deformaciones, vibraciones y aceleración. Entre las ventajas de los sensores ópticos se cuentan la resistencia en ambientes hostiles y la inmunidad al ruido eléctrico o magnético.

Los materiales piezoeléctricos, que sirven de actuadores, resultan buenos sensores. Los polímeros piezoeléctricos, como el fluoruro de polivinilideno (PVDF), se emplean en los sensores porque pueden manufacturarse en películas delgadas que se depositan en diversas superficies. La sensibilidad de

las películas de PVDF a la presión es tal, que se han logrado sensores táctiles capaces de leer Braille y de distinguir diferentes grados de papel de lija. Se ha propuesto el uso en robótica de películas ultrafinas de PVDF, de entre 200 y 300 micras de espesor. Un sensor así replicaría las facultades de la piel humana para detectar la temperatura, las características geométricas (salientes y esquinas) y texturas diferentes.

Actuadores y sensores constituyen las piezas clave de los sistemas de materiales inteligentes. Con todo, la esencia de esta nueva filosofía reside en la manifestación de la función vital por excelencia: la inteligencia. El grado exacto de inteligencia —o hasta qué punto el material debe ser ingenioso o simplemente adaptable— es cuestión debatida. Al menos, debe darse una capacidad de reconocer el entorno y vivir en él.

La capacidad de razonamiento que se intenta crear plantea obstáculos con los que la ingeniería no se había encontrado nunca. En particular, el enorme número de sensores, actuadores y sus fuentes de energía asociadas parece hacer inviable su conexión a un procesador central. Pero los diseñadores se han fijado en la naturaleza. Las neuronas no alcanzan la velocidad de los microcircuitos de silicio, pero aun así pueden realizar tareas complejas con una celeridad sorprendente porque sus conexiones son muy eficaces.

La clave parece ser la arquitectura jerárquica. El procesado de la señal y la acción resultante pueden tener lugar en niveles inferiores al cerebro o muy alejados del mismo. El reflejo de sacar la mano de un horno caliente, por ejemplo, está organizado directamente desde la médula espinal. Los comportamientos menos automatizados están organizados por centros cada vez más elevados dentro del cerebro. Además de eficiente, esa organización es resistente a fallos: de no ser por alguna razón orgánica subyacente, rara vez experimentamos una sensación de quemadura cuando cogemos un helado.

Los sesos de un sistema de materiales inteligentes siguen una organización similar. De hecho, los investigadores se benefician de las experiencias sobre vida artificial, un renuevo del campo de la cibernética. Entre los conceptos en boga sobre el control se cuenta la red neuronal artificial, que es un tipo de programación de los ordenadores que remeda las funciones de las neuronas. Estos programas pueden aprender, cambiar en respuesta a las contingencias, anticiparse a las necesidades y corregir errores, funciones más que adecuadas para los sistemas de materiales inteligentes. A la postre, los instrumentos informáticos y los algoritmos procesadores determinarán la complejidad alcanzada por estos sistemas, es decir, cuántos sensores y actuadores podrán emplear.

Los ingenieros incorporan ya sistemas de materiales inteligentes en diversas áreas. La NASA usa materiales electroactivos para modificar la óptica del Telescopio Espacial Hubble. Quizá la aplicación más asentada en este momento sea el control acústico: el ruido dentro del fuselaje de un avión sacudido por los motores o la señal acústica de un submarino. Para controlar el ruido podemos emplear la fuerza bruta; basta con añadir más masa para detener la vibración de la estructura. Pero no se trata de eso. Desde la óptica de los materiales inteligentes, procede inspeccionar las oscilaciones estructurales que emiten el ruido y emplear los actuadores distribuidos por toda la estructura para controlar las vibraciones más onerosas. En esa idea se fundamentan los auriculares supresores de sonido usados por los pilotos y de sistemas integrales que se están probando en aviones turbopropulsados de pequeña autonomía.

¿Hasta dónde llegarán los ingenieros con los materiales inteligentes? El futuro está en desarrollar un sistema que pueda desenvolverse con mayor complejidad. Un proyecto podría basarse en una arquitectura adaptable en la cual los sensores pudieran conectarse para crear el sistema específico deseado. Además, el diseño habría de ser altamente flexible. Si un sensor fallara, la arquitectura adaptable lo reemplazaría con la mejor alternativa posible y reconfiguraría interconexiones y algoritmo de control para encajar el cambio.

Las grandes matrices de sensores, actuadores, fuentes de energía y procesadores de control demandarán interconexiones tridimensionales. Tal complejidad podría acabar por encarecer tanto una estructura inteligente que no fuera rentable construirla. Problema que podría hallar solución en la técnica de la fabricación de microprocesadores: la fotolitografía. El proceso, semejante a la fotocopia, puede en principio producir grandes cantidades de componentes a un precio baratísimo. De ocurrir tal, una red de sensores se parecería en su detalle al microprocesador de silicio.

Los sistemas inteligentes no sólo pueden iniciar una revolución de los materiales, sino que pueden también constituir el siguiente paso en nuestra comprensión de los fenómenos físicos complejos. Se trata, en muchos aspectos, de los sistemas de registro ideales. Pueden examinar sus entornos, almacenar información sobre los materiales a lo largo del tiempo y "experimentar" con el fenómeno modificando las propiedades.

La influencia más duradera afectará, sin embargo, a la filosofía del diseño. Los ingenieros no tendrán que añadir masa y coste para garantizar la seguridad. Aprenderán no ya de las autopsias practicadas a las estructuras que han fallado, sino de las experiencias reales del edificio. Pronto tendrán la oportunidad de preguntarles a las estructuras cómo se sienten, dónde les duele y si las han maltratado últimamente. Incluso puede que identifiquen al malhechor.

¿Eliminarán los sistemas de materiales inteligentes todos los fallos catastróficos? No mientras los árboles sigan cayendo ante la fuerza de los huracanes y los pájaros sigan golpeándose contra las ventanas. Pero los sistemas de materiales inteligentes permitirán que los objetos inanimados se vuelvan más naturales y vivaces. Serán la manifestación de la nueva revolución de la ingeniería, el amanecer de una nueva edad de los materiales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANIMATING THE MATERIAL WORLD. Ivan Amato, en *Science*, volumen 255, páginas 284-286; 17 de enero de 1992.

PASSIVE SMART MATERIALS FOR SENSING AND ACTUATION, Carolyn M. Dry, en *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, volumen 4, n.º 3, página 415; julio de 1993.

SMART STRUCTURES AND MATERIALS 1995: SMART STRUCTURES AND INTEGRATED SYSTEMS, vol. 2443. Dirigido por Inderjit Chorpa. *International Society for Optical Engineering*, Bellingham, Washington, 1995.

Materiales compuestos avanzados

Cuando aparecieron por los años sesenta, los materiales compuestos avanzados prometían un futuro feliz. Los ingenieros soñaban con aeroplanos que flotaban y carrocerías ligeras que ahorrarían combustible. Aunque los materiales compuestos acabaron por emplearse en piezas de aeroplanos y automóviles y en equipos deportivos, podría ahora asignárseles un nuevo cometido en el mundo de la construcción.

La complejidad de estos materiales tiene mucho que ver con su presencia limitada en nuestra vida diaria. Se crean a partir de fibras devanadas obtenidas del carbón, vidrio y otros materiales, que se funden después en una matriz de plástico, cerámica o metal. Esa complicación hace problemática la fabricación en masa, por lo que su precio ha seguido siendo alto en comparación con el de la madera o el del metal.

La industria de los materiales compuestos confía en su aplicación a las infraestructuras. "En los próximos cinco años, el uso de materiales compuestos en la construcción será mucho mayor", asegura Hota V. S. GangaRao, de la Universidad de Virginia Occidental. Los materiales sustituirán inicialmente al acero usado en las barras de refuerzo que se introducen en el hormigón. Los materiales compuestos podrían bajar su precio hasta hacerlo competitivo con el acero, porque los materiales compuestos pesan la quinta parte que el metal. Con el tiempo, estructuras enteras se harán con ellos: se han construido ya algunos edificios, y en los tableros hay planos de puentes.

Los materiales compuestos también se podrían usar para reparar defectos. Doug Barnow, del Instituto de Materiales Compuestos, señala que con estos materiales se subsanó una profunda grieta en un puente de la Carretera Interestatal 95 cerca de Boca Ratón (Florida) por una fracción del coste necesario para reemplazar el puente (la opción que inicialmente se consideraba). Los materiales compuestos podrían reemplazar también algunos de los miles de postes de madera que hay a lo largo de la línea costera de Nueva York, donde la limpieza de las aguas del puerto ha sido tan efectiva que ahora gusanos y otros

Fabricación a medida

¿Dónde puede encontrar un juego de piñones de repuesto el ciclista que tiene la mala fortuna de romperlo en una pequeña aldea de Sierra Morena? La solución podría hallarse, muy pronto, en un disco flexible que el deportista lleve en la mochila. En las próximas décadas, una pieza de repuesto para una bicicleta o un automóvil puede "imprimirse" a partir de un fichero informático que contenga su diseño en el taller de la esquina, el futurible equivalente a la tienda de fotocopias abierta las veinticuatro horas.

En el caso de un engranaje, una máquina herramienta podría recibir de un archivo guardado en un disco la descripción geométrica de la pieza rota. El programa podría entonces indicar a la máquina cómo depositar una delgada capa de material estructural con una rociada de metal líquido atomizado o dirigiendo la energía de un láser sobre un lecho de metal en polvo. Otras capas que se fueran depositando se fundirían juntas, hasta componer el juego de piñones.

Este método de fabricación tuvo sus comienzos en el diseño rápido de prototipos. Con estereolitografía, deposición de formas, sinterización por láser y otras técnicas relacionadas que ya existen se pueden construir modelos a escala real para revisar los diseños o pueden ayudar a construir la maquinaria para fabricar una pieza. En años venideros, los avances en esos procesos pueden permitir que se utilicen para fabricar piezas acabadas directamente o incluso para forjar nuevas.

Conforme vayan madurando, estas técnicas pueden introducir también la plena adaptación del producto a los requerimientos del cliente: una máquina que pudo hacer un piñón de bicicleta un día quizá fabrique el carburador de automóvil al día siguiente. Esta capacidad de encauzar la información de las necesidades de un individuo hacia una serie de archivos forma parte de una tendencia que se desliga de la producción en masa de piezas normalizadas. La fabricación postindustrial abandona la cadena de montaje para producir bienes personalizados. Tendencia que recibe el nombre de fabricación ágil.

Un ejemplo de fabricación ágil puede encontrarse ya en la industria informática. Un cliente puede pedir un ordenador por teléfono y escoger

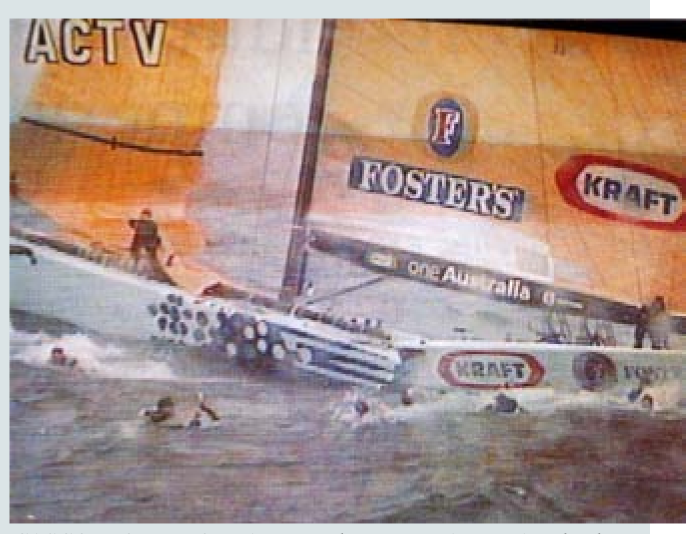
MODELO de bomba de petróleo construida mediante estereolitografía, una técnica para producir estructuras capa por capa con un láser.

organismos que carcomen la madera están medrando a costa de las estructuras.

Los materiales son resistentes tan sólo en las direcciones en las que las fibras están alineadas. Requieren, pues, un diseño más cuidadoso que los metales, que suelen proporcionar aguante en todas direcciones. El casco de fibra de carbono del yate *oneAustralia*, que participaba en la regata de la Copa de América, se quebró porque la tripulación había amarrado el cabo de una vela a un cabrestante alternativo, modificando las cargas sobre el casco.

Las técnicas para reciclar piezas desechadas de materiales compuestos han ido mejorando en los últimos años. Se han desarrollado al menos tres procesos diferentes que permiten separar las fibras de la resina, y esta facultad aumenta las posibilidades de otras aplicaciones. Con una mayor experiencia y un uso más generalizado, los ingenieros deberían ser capaces de aprovecharse mucho más de los materiales compuestos. A fin de cuentas, el mundo no tiene la misma rigidez en todas las direcciones.

La Redacción



CASCO NO RETORNABLE:** el yate* **oneAustralia, hecho de materiales compuestos, se rompió durante la última regata de la Copa de América. Los materiales compuestos son sensibles a los cambios inesperados de las cargas.*

entre una gama de microprocesadores, memoria volátil, discos duros y monitores. Incluso industrias más tradicionales, como las que hacen válvulas o interruptores eléctricos, han empezado a seguir esos pasos.

La fabricación a medida, sin embargo, requerirá mucho más que un paseo hasta el taller de la esquina. Los fabricantes necesitan hacer algo más que simplemente el piñón de una bicicleta rara. Para la fabricación en gran escala, las redes de comunicación pueden enlazar a los suministradores de un fabricante de automóviles o de pantalones vaqueros a fin de que sirvan los pedidos velozmente. Las redes podrían conectar clientes y fábricas. En el tercer milenio, puede que las tiendas de ropa estén equipadas con dispositivos ópticos que tomen las medidas: cintura, cadera, largo, etcétera, y las envíen a través de la red, de manera que se reciban los pantalones hechos a medida en cuestión de días. Los sistemas de fabricación flexibles —esos que permiten que una línea de maquinaria pueda ser reconfigurada rápidamente para hacer un nuevo tipo de pieza o de bien de consumo— podrían permitir a la factoría responder rápidamente a los cambios de la demanda o a pedidos especiales.

Un fabricante debe atender no sólo a los clientes sino también a la competencia. Aquí, de nuevo, la técnica de diseño rápido de prototipos puede ser útil. Las imágenes tomográficas por ordenador, a veces superiores en resolución a las que se sacan del cerebro o del corazón de los pacientes, le ofrecen ya a General Motors, por poner un caso, la posibilidad hipotética de registrar una grabación tridimensional del bloque motor de un Ford y construir después una réplica exacta en plástico usando la estereolitografía, una forma de diseño rápido de prototipos en la que se emplea un láser para producir estructuras de polímeros.

La reprografía tridimensional podría aprovecharse con fines más altruistas. Con un portátil de tomografía por ordenador se podría obtener ya en la ambulancia la imagen tridimensional del hueso fracturado. En el hospital, los cirujanos usarían el modelo del hueso para llevar a cabo la operación. Luego, mientras el paciente estuviera en el quirófano, se podría fabricar una prótesis para implantarla en el miembro. La Universidad de Dayton ha empezado a desarrollar un proceso de diseño rápido de prototipos para fabricar prótesis cerámicas.

Más aún, las técnicas de diseño rápido de prototipos posibilitan la combinación de material electrónica en formas únicas, como los contornos de un cráneo humano, por ejemplo. La técnica de deposición de forma, investigada en las universidades de Stanford y Carnegie Mellon, permite rodear con plásticos, metal o cerámica los microprocesadores y los cables que los conectan. Algún día construirán un casco o una gorra reforzada equipada con un microprocesador. Este dispositivo podría almacenar toda la información contenida en un manual de reparaciones; los datos podrían ser transmitidos por una conexión infrarroja o por cable y mostrados en una imagen proyectada sobre una pequeña pantalla en la lente de unas gafas. El casco podría contener asimismo sensores microscópicos que proporcionaran las coordenadas geográficas con una precisión de metros.

Con el tiempo, la técnica y las ideas novedosas sobre cómo dirigir empresas podrían combinarse. Las prendas de vestir “inteligentes”, por ejemplo, pueden llevar por sí solas a la fabricación ágil. Un lunes un fabricante de ropa podría estar produciendo camisas que contuvieran un sensor para detectar la presencia de armas químicas en el campo de batalla. Al día siguiente la misma línea de fabricación podría estar sacando una prenda que liberase cantidades controladas de desodorante cuando los sensores de una blusa detecten un cierto nivel de transpiración. El verdadero fabricante ágil debe ser capaz de vérselas con el sudor o con el sarin.

La Redacción

Superconductores de alta temperatura

En creciente expansión, conducen la corriente sin ofrecer resistencia y a un coste menor que los superconductores comunes

Paul C. W. Chu

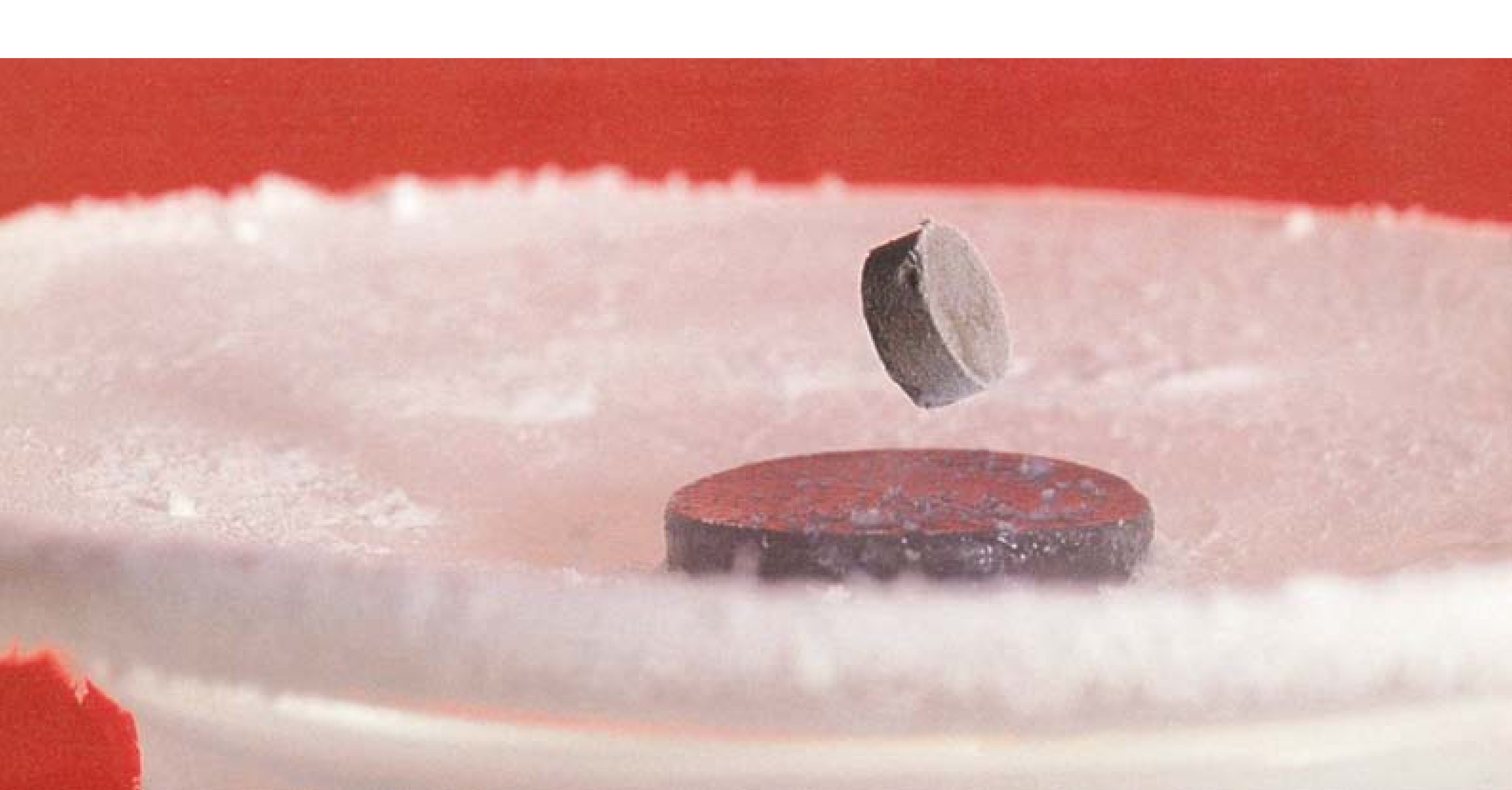
PAUL C. W. CHU dirige el centro de superconductividad de la Universidad de Houston.

A la naturaleza le gusta el camino de la resistencia mínima, lo mismo para la transferencia de calor que para el flujo de agua. Si imitamos esa pauta en la fabricación y el empleo de los aparatos, podremos ahorrar energía y trabajo, frenar la degradación del medio y, en último término, mejorar nuestra calidad de vida. Pero la naturaleza se muestra remisa a revelarnos la senda de la resistencia mínima. Y quién sabe si sólo bajo condiciones restrictivas.

Fijémonos en el camino de la resistencia nula, es decir, en la superconductividad, o capacidad de conducir energía sin oponer resistencia. La superconductividad se descubrió en 1911, cuando Heike Kamerlingh Onnes enfrió mercurio, usando helio líquido, hasta cuatro grados por encima del cero absoluto, es decir, cuatro grados kelvin (una temperatura ambiente de 25 grados Celsius equivale a 298 grados kelvin). A esa temperatura, observó Onnes, el mercurio transmitía de repente la electricidad sin pérdidas. Desde entonces, se han encontrado otros metales y aleaciones que se tornan superconductores si se les enfría a temperaturas suficientemente bajas, la mayoría de ellos por debajo de 23 grados kelvin. Unas cotas tan extremas —más frías que la superficie de Plutón— sólo pueden alcanzarse con gases raros, como el helio líquido, o con avanzados sistemas de refrigeración. A pesar de estas condiciones, el fenómeno ha estimulado diversas técnicas, como las máquinas de formación de imágenes por resonancia magnética, los aceleradores de partículas y sensores geológicos para prospecciones petrolíferas, entre otros.

Con todo, la superconductividad está predestinada a provocar un impacto todavía mayor en la sociedad del siglo próximo, gracias a un descubrimiento de finales de los ochenta. K. Alexander Müller y J. Georg Bednorz observaron que el óxido de cobre, bario y lantano se volvía superconductor a la temperatura de 35 grados kelvin. Pronto se difundieron noticias más espectaculares: en 1987 Maw-Kuen Wu y yo, junto con otros colaboradores, descubrimos superconductividad a 93 grados kelvin en óxido de itrio, bario y cobre (abreviadamente YBCO). A esa temperatura, el YBCO se volvería superconductor en un baño de nitrógeno líquido, que —a diferencia del helio— es abundante y barato. Ese trabajo provocó una actividad febril entre los investigadores para encontrar otros cupratos superconductores. Se han descubierto ya más de 100 superconductores cuyas temperaturas críticas exceden a las de los mejores superconductores tradicionales.

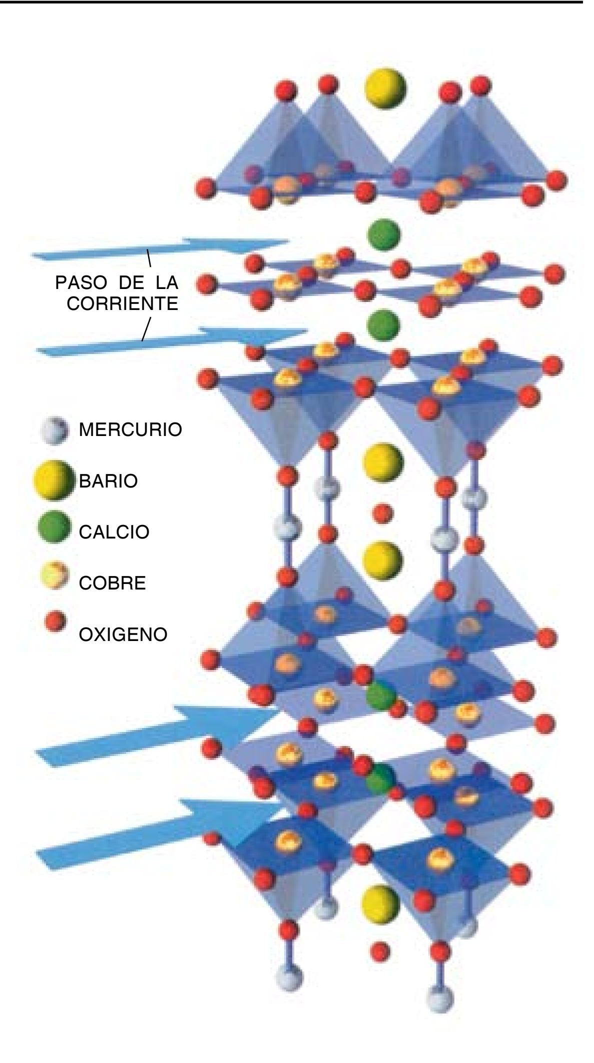
¿Pueden seguir los superconductores los pasos de sus primos, los semiconductores, y transformar para bien nues-



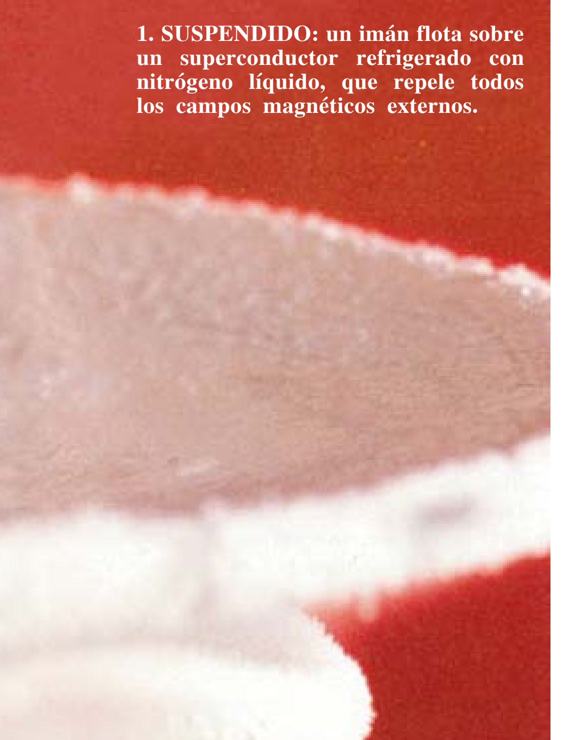
tras vidas? Un "sí" con reservas no es excesivamente optimista, pues los superconductores pueden irrumpir en cada uno de los aspectos de nuestra existencia en el que esté involucrada la electricidad. Los trenes superconductores, grandes sistemas de almacenamiento de energía y ordenadores ultrarrápidos no son todavía objetivos alcanzables, pero bastantes otras aplicaciones serán pronto posibles, en principio: generación, transmisión y almacenamiento eficiente de electricidad; detección de señales electromagnéticas demasiado pequeñas para que se puedan registrar con los medios al uso; protección de las redes eléctricas contra subidas repentinas, caídas y cortes; y el desarrollo de técnicas de comunicación celular más rápidas y compactas.

Esas eventuales aplicaciones son en cierta manera casi demasiado bonitas para ser ciertas, dada la multitud de trabas que se pusieron de manifiesto poco después del descubrimiento de los cupratos. Una de las mayores era que los cupratos sólo pueden conducir una cantidad limitada de electricidad sin ofrecer resistencia, un problema derivado de la disposición de las capas que constituyen el material. Si las capas no se alinearan adecuadamente, los electrones chocarían contra las fronteras de la región desalineada y se frenarían. Los campos magnéticos podrían complicar aún más la situación, si llegaran a penetrar en esta región desalineada e interrumpir el flujo libre de la corriente. Hasta un material bien orientado puede sufrir esta intrusión si el campo magnético es sumamente intenso.

Pero existe un modo de orillar tales escollos: depositar capas micrométricas de material sobre sustratos bien organizados. Este proceso tiene la virtud de alinear las capas del material con mayor corrección. Aunque las películas delgadas no pueden transmitir corrientes muy elevadas, muchas empresas han empezado a comercializar instrumentos en los que se emplea ese método. Du Pont y otras fabrican aparatos para instrumentos militares y sistemas telefónicos celulares que operan en la frecuencia de las microondas. Las películas semiconductoras proporcionan una señal más enérgica y la procesan mejor en un espacio físico menor que si se emplearan conductores ordinarios. Conductus e IBM producen peculiares SQUID, o dispositivos superconductores de interferencia cuántica. Funcionando a 77 grados kelvin, la temperatura del nitrógeno líquido, estos sensores de campos magnéticos tienen unas prestaciones similares a las de los SQUID habituales, que operan a 4,2 grados kelvin.



2. LAS AUTOPISTAS DE ELECTRONES están localizadas entre planos de átomos de cobre y de oxígeno, como se muestra en esta representación del óxido de cobre, calcio, bario y mercurio, que pierde la resistencia eléctrica a 134 grados kelvin (una de las mayores entre los superconductores de alta temperatura).



1. SUSPENDIDO: un imán flota sobre un superconductor refrigerado con nitrógeno líquido, que repele todos los campos magnéticos externos.

Mientras que unos investigadores siguieron la senda de las películas delgadas, otros se enfrentaron al problema de la capacidad de corriente limitada y la intrusión de los campos magnéticos agarrando el toro por los cuernos, con la esperanza de conseguir cables y motores y otras aplicaciones "de bulto". Concibieron varios procedimientos para superar los obstáculos. Por ejemplo, un procesado cuidadoso que alineaba las capas de cupratos incrementó la capacidad de corriente. Se buscó también el medio de introducir defectos estructurales en lugares seleccionados del superconductor, que "inmovilizarían" los campos magnéticos y limitarían su tendencia disgregadora.

Esas modificaciones han producido resultados notables. La densidad de corriente máxima que puede transportar ahora el YBCO es de un millón de ampères por centímetro cuadrado a 77 grados kelvin, descendiendo a 400.000 ampères sólo cuando se aplica un campo magnético de nueve teslas. Ambos valores superan de lejos los obtenidos en un comienzo: el YBCO sólo permitía el paso de 10 ampères por centímetro cuadrado y perdía toda conductividad en un campo magnético de sólo 0,01 tesla. En muchos aspectos, la capacidad de corriente que se obtiene ya es comparable con la de los superconductores tradicionales. Cuando se refrigeran a la misma temperatura y se les somete a campos magnéticos elevados, en muchos aspectos los cu-

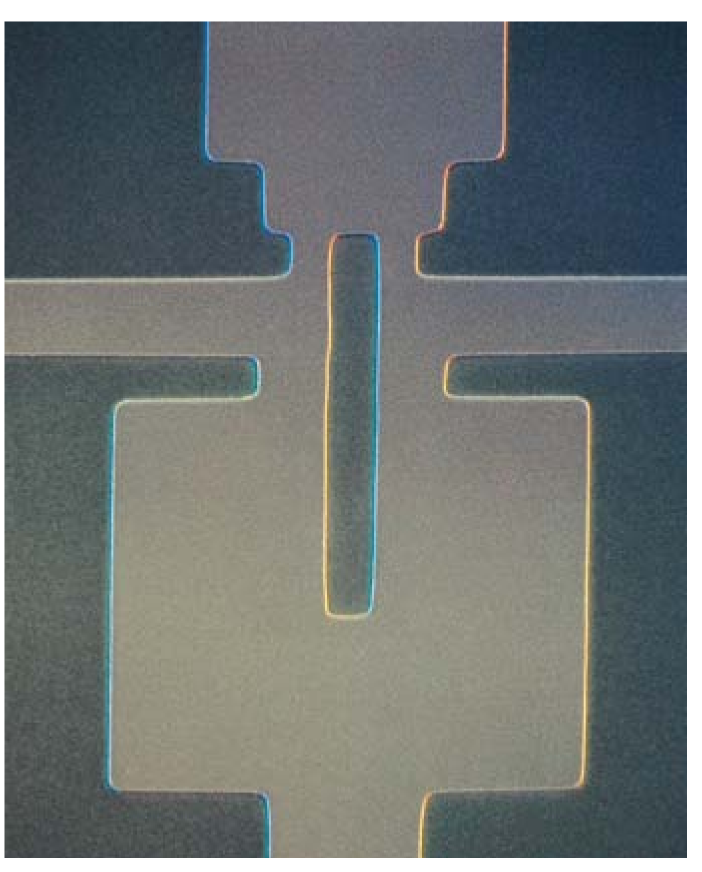
pratos se comportan mejor que los parientes de baja temperatura.

Había que deshacer otro nudo. Los cupratos son básicamente cerámicas, frágiles y difíciles de manufacturar para obtener cables. Mediante nuevas técnicas de procesado y seleccionando los materiales, se han logrado cables flexibles de tan quebradiza sustancia. Se compacta un polvo precursor en un tubo de plata, que se enrolla y se prensa en cables. Un proceso de cocido convierte el polvo en cuprato con base de bismuto. Las muestras pequeñas pueden transportar 200.000 ampères por centímetro cuadrado a 4,2 grados kelvin (unas 200 veces la cantidad con la que habitualmente puede vérselas el cobre) y 35.000 ampères a 77 grados kelvin. American Superconductor devana ya cables kilómetricos. Empleando haces iónicos, el Laboratorio Nacional de Los Alamos produjo cinta flexible de YBCO que resiste los campos magnéticos mucho mejor que los cables de bismuto.

Se han construido varios aparatos que demuestran la viabilidad de las aplicaciones "de bulto". Intermagnetics General y la Universidad de Houston han fabricado imanes de cupratos que pueden generar hasta dos teslas, un campo unas cinco veces mayor de lo que se obtiene con los mejores imanes permanentes. Reliance Electric usará cable de American Superconductor para montar un motor de cinco caballos. Estas y otras empresas han elaborado anillos para almacenar energía y limitadores de corriente de pérdida que protegen los equipos frente a las sobrecargas. Aunque hay instrumentos con conductores ordinarios análogos a algunos de estos instrumentos, los superconductores deberían brindar unas prestaciones mucho mejores en eficiencia y capacidad.

A riesgo de equivocarme, aventuraré algunos pronósticos sobre el impacto de la superconductividad de alta temperatura en nuestras vidas para los próximos 10 a 30 años, basándome en los logros de los últimos nueve.

Muchos de los aparatos de demostración que están en fase de construcción se generalizarán conforme la fabricación y el procesado se vayan refinando y mejoren los rendimientos. Los SQUID, que pueden detectar las débiles señales magnéticas del cerebro y del corazón, se convertirán en herramienta habitual del diagnóstico. Los ensayos han demostrado que estos sensores localizan con precisión las zonas del cerebro responsables de la epilepsia focal. Los SQUID serán también un artículo corriente en las comprobaciones no destructivas de tuberías y puentes, pues la fatiga del metal produce una firma magnética particular. Las virtudes del nitrógeno líquido deberían estimular el uso más amplio de estos detectores en todas las áreas de la investigación científica.



3. El SQUID, o dispositivo superconductor de interferencia cuántica, se emplea como un detector finísimo de campos magnéticos. Este, de sólo 30 micras de ancho, contiene dos uniones Josephson (ocultas) que se hallan justo por encima de la banda horizontal que atraviesa la imagen.

Los aparatos de formación de imágenes por resonancia magnética probablemente se harán más pequeños y ganarán en rendimiento. Con los superconductores, las bobinas detectoras y los amplificadores serán más sensibles, así que el campo magnético necesario para obtener una imagen será menor, lo que resultará en una máquina más pequeña y barata. La mayor sensibilidad llevará aparejado un procesado más rápido de la señal, con lo cual se reducirá mucho el actual coste operativo de la maquinaria.

Menos manifiestos, pero con gran repercusión económica, los superconductores de alta temperatura, funcionando como filtros y antenas, se abrirán camino en los sistemas de telecomunicaciones por microondas. Se volverán indispensables para incrementar la capacidad de las estaciones de base de los teléfonos celulares por un factor de tres a 10. También serán un equipo corriente en los aviones militares para filtrar y eliminar las señales espurias de radar que podrían confundir a los ordenadores de a bordo.

Las áreas pobladas podrían ver la sustitución de los viejos cables enterrados por líneas superconductoras para satisfacer la creciente demanda de electricidad. Tales líneas de transmisión podrían también reducir las tarifas eléctricas: casi el 15 por ciento de la factura de la luz proviene de pérdidas debidas a la resistencia eléctrica. Las centrales de energía emplearán estos materiales para limitadores de sobreintensidad, proporcionando voltajes más estables a una sociedad que depende de los ordenadores.

El almacenamiento de energía es otra posibilidad. Podrían generalizarse los dispositivos superconductores magnéticos de almacenamiento de energía (SMES): una bobina superconductora se cargaría y luego se enroscaría formando un anillo. La corriente teóricamente circularía sin pérdidas. Cuando se necesitara la electricidad, la bobina se abriría y se conectaría de nuevo a la red, suministrando más corriente. Unos anillos mejorados, mantenidos por rodamientos superconductores sin fricción y que girarían

continuamente hasta que se deseara extraer su energía, servirían para el mismo propósito.

Los cupratos pueden hallar acomodo en los equipos de exploración espacial. A resguardo de los rayos directos del sol, las temperaturas del espacio están por debajo de las necesarias para mantener la superconductividad de muchos de estos materiales. Con esta misión en el punto de mira, la NASA ha financiado el desarrollo de dispositivos sensores y electromecánicos para las naves espaciales.

Se husmean aplicaciones incluso más inciertas, sobre todo en el dominio de los ordenadores. Una es fabricar circuitos con uniones Josephson. Una unión Josephson, que se consigue interponiendo una delgada barrera aislante entre dos capas superconductoras, puede activarse y desactivarse rápidamente con baja potencia. Las uniones podrían reemplazar los circuitos de los ordenadores y, en teoría, multiplicar por 50 la velocidad de computación. Obstáculos técnicos, sin embargo, han impedido un progreso decidido hacia el ordenador superconductor. Puede que un sistema híbrido sea viable. Aquí los problemas clave son la fabricación de circuitos superconductores fiables y el diseño de interfaces adecuadas entre superconductores y semiconductores, por no mencionar la competencia del semiconductor, en continua mejora.

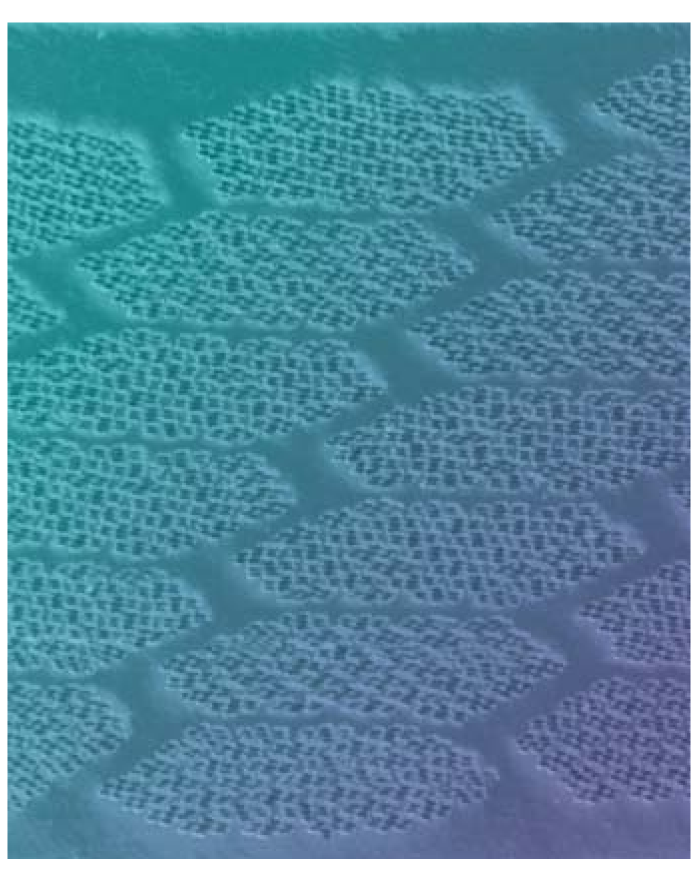
De la investigación básica sobre superconductores puede derivarse una transformación técnica aún mayor. La complejidad de los materiales impide someter a comprobación el mecanismo subyacente bajo la superconductividad de alta temperatura. La teoría tradicional de la superconductividad afirma que las vibraciones del sólido hacen que los electrones, que ordinariamente se repelen entre sí, formen parejas. Estas parejas pueden entonces desplazarse a gran velocidad y sin resistencia.

Esta idea, sin embargo, parece inapropiada para los cupratos. La alta temperatura de transición implica que el sólido tendría que agitarse tanto, que la estructura cristalina del compuesto no alcanzaría estabilidad suficiente para que los electrones formaran parejas. Alguna otra cosa debe estar emparejando los electrones. Un indicio puede hallarse en el estado normal (o sea, en el que no es superconductor). En él los materiales exhiben propiedades eléctricas y magnéticas insólitas que desafían nuestros conocimientos. Se están llevando a cabo muchos experimentos para concretar el alcance de las teorías. Sospecho que muchos mecanismos están actuando a la vez para dar lugar a la superconductividad en los cupratos y que quedarán de manifiesto en los próximos 10 años.

Una vez que los materiales no guarden secretos, quizá se obtengan temperaturas de transición más altas. El hito para una sustancia bajo condiciones normales es de 134 grados kelvin, registrado en 1993 por el equipo de Andreas Schilling, con óxido de cobre, calcio, bario y mercurio. Comprimiendo el compuesto, Dave Mao y yo, junto con otros colaboradores, elevamos la temperatura crítica hasta 164 grados kelvin. Esta temperatura, que equivale a –109 grados C, se puede alcanzar con las técnicas que se usan en el aire acondicionado comercial.

Podría haber superconductores a temperatura ambiente. Se sabe de resultados esporádicos pero irreproducibles que sugieren superconductividad a temperaturas de hasta 250 grados kelvin (–23 grados Celsius). Un superconductor de alta temperatura iniciaría otra revolución industrial.

Durante los últimos nueve años, los científicos han hecho de la regla una excepción al descubrir los superconductores de alta temperatura. Luego han hecho de la excepción una regla desvelando algunos misterios del fenómeno. Ahora intentan hacer de la regla algo práctico poniendo de relieve las posibilidades técnicas del efecto. Aunque sin duda surgirán aplicaciones imprevistas (nadie predijo que la resonancia magnética nacería de los superconductores), la tierra prometida de la alta temperatura consistirá más probablemente en cambios sutiles, aunque de enorme interés económico.



4. CABLE SUPERCONDUCTOR que pone de manifiesto al corte lateral filamentos superconductores de cuatro micras de ancho empaquetados en patrones hexagonales. Este diseño, empleado por American Superconductor, ayuda a que el quebradizo material se vuelva flexible y fuerte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUPERCONDUCTIVITY ABOVE 90 K. C. W. Chu en *Proceedings of the National Academy of Sciences* USA, vol. 84, n.º 14, págs. 4681-4682; julio de 1987

INTRODUCTION TO HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY. T. P. Shea-hen. Plenum Press, 1994.

PHYSICAL PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS. Vols. 1-4. Donald M. Ginsberg. *World Scientific*, Singapore y Teaneck, (Nueva Jersey), 1989, 1990, 1992 y 1994.

La robótica del siglo XXI

Los autómatas podrían entrar pronto en el servicio doméstico

Joseph F. Engelberger



Desde que Unimation Inc. instaló el primer robot industrial en 1961 para extraer las piezas de un molde, más de 500.000 aparatos similares se han puesto en funcionamiento en factorías de todo el mundo. Se les ve en las petroquímicas, en las cadenas de montaje y en las instalaciones de manufactura de electrónica, reemplazando la mano del hombre en operaciones repetitivas y peligrosas. ¿Saldrán del entorno industrial para servir a la gente en sus necesidades cotidianas?

Ray Bradbury predice en sus relatos de fantasía científica la conversión de nuestros hogares en sistemas autómatas envolventes que trascenderán a sus propios habitantes. Isaac Asimov, por contra, imaginaba robots autónomos puestos a nuestro servicio. ¿Quién acertará? Empecemos por romper una lanza en favor de Bradbury. Podemos disfrutar ya del proyecto Casa Inteligente, donde un ordenador central optimiza la calefacción, la luz, el aire acondicionado y la seguridad. Añádase el control automático de las comunicaciones, diversiones, búsqueda de datos y compras en el ciberespacio, y buena parte de la conjetura de Bradbury está justificada.

Pero no del todo. La casa de Bradbury iba más allá, automatizaba la cocina, la limpieza y la higiene personal. Una horda de ratones robóticos salían de los sótanos y se desperdigaban por la casa para llevarse la basura. Los ocupantes humanos no tenían que mover un dedo. Pero eso no es creíble. Aunque ya están automatizadas las lavadoras, lavavajillas o cafeteras, las tiene que llenar un ser humano, con sus manos. Los ratones robóticos que se lleven la suciedad pueden ser técnicamente factibles a un precio elevado, pero parece más práctico pasar la aspiradora de vez en cuando.

En ese aspecto, el panorama pintado por Asimov tiene más visos de realidad. El robot doméstico sería un autómata autónomo. Realizaría las faenas del mismo modo que nosotros, usando los mismos aparatos y herramientas similares, respondiendo a órdenes verbales. Por tanto, los robots del futuro serán por necesidad antropomórficos en cierta medida. Para compartir la casa con un humano, el robot debe ser capaz de desplazarse autónomamente por el espacio habitable, ver e interpretar las necesidades, y proporcionar materiales y servicios con precisión.

Antes de que las primeras décadas del siglo XXI pasen a la historia, la robótica habrá experimentado alguna innovación trascendental. Pero es procedente encuadrar esta profecía dentro del marco de la técnica disponible. Los estudiosos de la robótica cuentan con valiosos recursos a su alcance: electrónica, servomecanismos, controladores, sensores y equipos de comunicaciones, por nombrar algunos. Van mejorando constantemente, sobre todo los de percepción sensorial. Balizas activas y pasivas, visión en estéreo e incluso un receptor del Sistema Global de Posición (una red de satélites que informan sobre la posición) permitirán a los robots trasladarse por su entorno sin problemas. La síntesis y el reconocimiento de la voz asegurarán la comprensión de las necesidades del amo.

La primera utilidad de un robot construido con estas herramientas probablemente sea la de acompañar a los ancianos y a los disminuidos, quizás antes del fin de siglo. Será capaz de proporcionar ayuda ambulante (ofrecer un brazo), llevar y traer objetos, cocinar, limpiar, vigilar las constantes vitales, distraer y comunicarse con los humanos. Eso no es ciencia ficción. Es posible ahora, lo único que se requiere es una ingeniería eficaz.

De todas maneras, señalaré que el robot doméstico del siglo que viene, por útil que sea, no constituirá la réplica de un servicio leal integrado por un mayordomo, cocinero, asistenta y enfermera. La intervención humana será aún necesaria para la higiene personal, para vestirse y arreglarse y para la administración invasiva de medicamentos. Una inteligencia artificial no proporcionaría argumentos completamente satisfactorios para una conversación.

Los robots para el servicio personal puede que también fomenten el avance de sus parientes en la industria, que todavía están asignados en su mayoría a tareas de "poner y sacar". Fabricar robots más adaptables y comunicativos puede ayudar a reducir la reprogramación que ahora requieren. A medida que los robots se perfeccionen, se les irá asignando tareas más importantes, peligrosas y tediosas. Alimento la esperanza de que, tarde o temprano, la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio y otras agencias espaciales de todo el mundo se convenzan de que nuestros emisarios en el espacio deben ser los robots. Ese hábitat tan desesperadamente hostil no es lugar para la carne y la sangre. El empleo de robots puede acabar haciendo que la colonización humana del espacio proceda mucho más rápidamente. En Marte, por ejemplo, los robots podrían crear un ambiente agradable antes de la llegada de los humanos.

En el curso de la evolución, la humanidad apareció tarde. La continuidad de nuestro avance es tan sólo inhibida por la onerosa tarea de la selección natural y por la laboriosidad de los procesos de aprendizaje que constituyen la herencia de nuestra progenie. Por contra, cada nuevo robot puede incorporar rápidamente la mejor capacidad intelectual y física disponible en cada momento. Puede aplicársele en breves segundos toda la experiencia robótica que le precede. La robótica podría perfectamente determinar cómo evoluciona la actividad humana en el siglo XXI.

JOSEPH F. ENGELBERGER, llamado el padre de la robótica, preside la empresa Transitions Research, especializada en robots para el servicio personal.



ENERGIA Y MEDIO AMB



Los cambios más decisivos vendrán de las soluciones dadas al problema de los residuos en la industria, la agricultura y la producción energética.

INDICE

EL AGUA FRIA extraída de las profundidades del Pacífico genera limpiamente electricidad en el Laboratorio de Energía Natural de Hawai. Además, a partir de ella se condensa agua dulce, se refrigeran los edificios y se crean grandes estanques abiertos para la acuicultura, incluida la de microalgas del género *Spirulina* (*izquierda*).

Energía solar

Gracias a la técnica, la radiación procedente del Sol ofrecerá electricidad y combustibles baratos y limpios

William Hoagland

Cada año, la superficie de la Tierra recibe de la luz solar una energía que viene a ser diez veces la que contienen juntas las reservas conocidas de carbón, petróleo, gas natural y uranio, y 15.000 veces el consumo anual de energía en el mundo. Se llevan quemando madera y otras formas de biomasa miles de años, lo que es una manera de sacar provecho de la energía solar. Pero del Sol también provienen las energías hidráulica, eólica y fósil; todas las formas, en realidad, menos la nuclear, la geotérmica y la de las mareas.

No es nuevo que se intente sacar partido de la energía solar. En 1861, Augustin-Bernard Mouchot, profesor del liceo de Tours, obtuvo la primera patente de un motor movido por ella. Otros pioneros investigaron también su uso, pero las ventajas del carbón y del petróleo eran abrumadoras. Por ello, cayó en el olvido hasta que la crisis de los años setenta amenazó las grandes economías.

El desarrollo económico depende de la energía. Se prevé que hacia el 2025 la demanda mundial de combustible habrá crecido en un 30 por ciento y la de electricidad, en un 265. Aunque se avance en las mejoras de uso y conservación, se requerirán nuevas fuentes de energía. La solar podría ofrecer el 60 por ciento de la electricidad y hasta el 40 por ciento del combustible.

La utilización de técnicas solares más depuradas redundará beneficiosamente en el problema de la contaminación atmosférica y en el del cambio climático global. En los países subdesarrollados podría aliviar el daño que causan al medio las prácticas derrochadoras de quema de materia vegetal para cocinar y calentar. Las técnicas solares avanzadas usan, en potencia, menos tierra que el cultivo de biomasa: la fotosíntesis capta alrededor de menos de un uno por ciento de la luz solar disponible; las técnicas solares modernas llegan, en el laboratorio al menos, a rendimientos del 20 al 30 por ciento, lo bastante altos para que, a modo de ejemplo, los Estados Unidos satisficieran su demanda actual de energía dedicando menos del dos por ciento de sus tierras a la captación de energía.

No es probable que predomine una sola técnica solar. Las variaciones económicas y las diferencias en la luz solar de unas regiones a otras harán que en cada una de ellas lo natural sea inclinarse por unos métodos o por otros. Es posible generar electricidad quemando biomasa, levantando turbinas eólicas, construyendo motores térmicos



alimentados solarmente, disponiendo células fotovoltaicas o domeñando la energía de los ríos con presas. El hidrógeno combustible se puede producir con células electroquímicas o mediante procesos biológicos —en los que intervienen microorganismos o enzimas— que activen la luz solar. Combustibles del estilo del etanol y el metanol se generan a partir de la biomasa o mediante otras técnicas solares.

La energía solar está también, en forma de olas y gradientes de temperatura y salinidad, en los océanos, reservas potenciales a explotar. Si bien la energía almacenada, aunque enorme, no se halla concentrada y resulta muy difícil de extraer.

Se pueden quemar desechos agrícolas o industriales para mover las turbinas con el calor que generen. Las virutas de madera, por ejemplo. Una instalación así será competitiva con respecto a la producción corriente de electricidad donde la biomasa sea barata. Ya existen muchas, y están encargadas más. Hace poco se terminó en Värnamo, Suecia, una moderna central de energía que usa madera gasificada para alimentar un motor de chorro. Convierte el 80 por ciento de la energía de la madera en seis megawatts de electricidad y nueve de calor para la ciudad. La combustión de biomasa puede contaminar, pero con esta técnica resulta sumamente limpia.

El progreso de la ingeniería de la combustión y de la biotecnología ha hecho que también sea económica la conversión del material vegetal en combustibles líquidos o gaseosos. Es posible gasificar productos forestales, "cultivos de energía", residuos agrícolas y otros desechos, y utilizarlos para sintetizar metanol. Se desprende etanol cuando fermentan los azúcares, derivados de la caña de azúcar, de diversos cereales o de la madera (mediante la conversión de la celulosa).

Los alcoholes se mezclan ahora con gasolina para aumentar el rendimiento de la combustión en los motores de los coches y reducir las emisiones del tubo de escape. Pero por sí solo el etanol puede ser un combustible eficiente, como han demostrado los investigadores brasileños. Hacia el año dos mil, su costo podría competir con el de la gasolina. En el futuro, es posible que gracias a las plantaciones de biomasa se "cultive" esa energía en las tierras degradadas de las naciones en desarrollo. Los cultivos de energía podrían además propiciar una mejor gestión de las tierras y mayores beneficios. La dificultad estriba, empero, en lograr con regularidad cosechas grandes en climas dispares.

Aun teniendo en cuenta las innovaciones técnicas siguen en pie dudas sobre el grado de utilidad de la biomasa. La fotosíntesis es en sí misma ineficiente y requiere un aporte muy grande de agua. Un estudio encargado por las Naciones Unidas concluía en 1992 que la biomasa podría satisfacer hacia el 2050 el 55 por ciento de las necesidades energéticas mundiales. Pero la realidad dependerá de qué otras opciones se disponga.

Un 0,25 por ciento, más o menos, de la energía del Sol que llega a la baja atmósfera se transforma en viento; una parte minúscula del total, pero, con todo, una fuente de energía considerable. Según un cálculo aproxi-

1. DISTINTOS DISPOSITIVOS para captar la energía solar. Las turbinas eólicas (*a*) extraen la energía que el calentamiento solar diferencial almacena en la atmósfera. Un horno solar (*b*) utiliza la radiación que se refleja hacia una torre central para impulsar un motor. Los paneles solares (*c* y *fondo)* emplean las células fotovoltaicas para crear electricidad. Y cultivos como la caña de azúcar (*d*) sacan partido de la energía solar mediante la fotosíntesis. De la caña de azúcar se extrae alcohol, combustible limpio.



mado, el 80 por ciento del consumo eléctrico de los Estados Unidos podría quedar cubierto con la energía eólica de Dakota del Norte y del Sur sólo. Los problemas que en un principio rodearon la fiabilidad de los "parques eólicos" han sido en general resueltos, y en ciertos lugares el costo de la electricidad producida es ya competitivo comparado con el del proceso corriente de generación.

En las zonas de viento fuerte —donde en promedio su velocidad sea de más de 7,5 metros por segundo—, la electricidad de los parques eólicos, en kilowatt-hora, resulta barata, pero aún podrá recortarse más. En California y en Dinamarca, más de 17.000 turbinas eólicas están ya integradas en las redes de las compañías eléctricas.

Una de las razones de la reducción es que gracias al empleo de materiales más fuertes y ligeros en las palas las máquinas eólicas son ahora apreciablemente mayores. Una sola turbina aporta hasta 0,5 megawatts. Los avances de las turbinas de velocidad variable han reducido la tensión y la fatiga de las partes móviles, con lo que ha aumentado su fiabilidad. En los próximos veinte años habrá probablemente unos materiales mejores para aletas y transmisiones, y unos controles y una electrónica que permitan manejar con menos brusquedad niveles altos de energía eléctrica.

Entre los primeros usos de la energía eólica estará con mucha probabilidad el que se hará de ella en las islas u otras áreas alejadas de la red eléctrica. Muchas comunidades que están en esas circunstancias importan diesel para generar electricidad, y las hay que buscan activamente otras soluciones. A mediados del siglo que viene, la energía eólica podría suministrar del 10 al 20 por ciento de la demanda mundial de energía eléctrica.

La limitación más importante de la energía eólica es su intermitencia. Si constituyese más del 25 al 45 por ciento del suministro total de energía, cualquier escasez causaría perjuicios económicos graves. Con mejores medios de almacenamiento de la energía, el porcentaje de energía eólica utilizada en la red podría aumentar sustanciosamente.

Una forma de generar electricidad es impulsar un motor con el calor radiante y la luz solares. Estos dispositivos termosolares presentan cuatro componentes básicos: un sistema colector de luz solar, un receptor que la absorbe, un aparato que almacena el calor y un conversor que lo transforma en electricidad. Hay tres configuraciones de colector básicas: un disco parabólico que enfoca la luz en un punto, un conducto parabólico que la enfoca en una línea y una serie de espejos planos dispuesta a lo ancho de varias hectáreas que la refleja hacia una misma torre central.

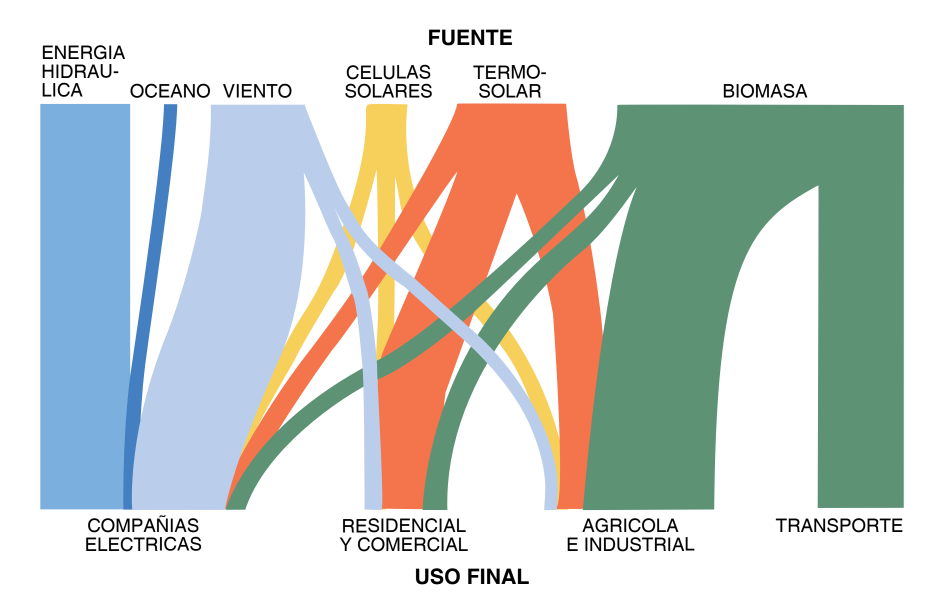
Estos dispositivos convierten entre un 10 y un 30 por ciento de la luz solar directa en electricidad. Pero queda mucho por investigar sobre su duración y

WILLIAM HOAGLAND ha dirigido programas oficiales sobre materiales solares, combustibles y biocombustibles. Hoy preside su propia empresa.

fiabilidad. Un problema técnico concreto es el de elaborar a bajo precio un motor de Stirling (donde el gas contenido en un sistema cerrado recibe continuamente calor desde el exterior) cuyo rendimiento sea bueno.

Los estanques solares, otra fuente térmico-solar, contienen cerca de su fondo agua muy salina. Lo normal es que el agua caliente suba a la superficie, donde se enfría. Pero la salinidad hace que el agua sea más densa; puede así haber en el fondo agua caliente, que retendrá entonces su propio calor. El estanque atrapa el calor radiante del Sol y se crea un fuerte gradiente de temperatura. Se extrae el fluido caliente y salado del fondo, y se deja que se evapore; el vapor impulsa un motor de ciclo de Rankine, similar al instalado en los coches. El líquido frío de la parte superior sirve para acondicionar el aire.

Un producto secundario de este proceso es la obtención de agua dulce a partir del vapor. Los estanques solares están condicionados por la gran cantidad de agua que necesitan, y son más apropiados para comunidades remotas que, además de energía, necesiten agua dulce. Se ha investigado mucho su utilización en países de clima cálido y seco, como Israel.



2. LA DISTRIBUCION de la energía solar renovable para el año 2000 muestra la importancia de las distintas formas de explotar ese recurso.

La conversión de la luz directamente en electricidad por medio del efecto fotovoltaico fue descubierta por Edmond Becquerel en 1839. Cuando se excitan los fotones en un aparato fotovoltaico, por lo común hecho de silicio, arrancan electrones de sus posiciones estables y les permiten moverse libremente por el material. Puede entonces establecerse un voltaje mediante una unión semiconductora. En los años cuarenta de nuestro siglo se desarrolló un método de producción de silicio cristalino purísimo para las células fotovoltaicas con rendimientos y voltajes altos. Resultó ser todo un acicate para la industria. En 1958, el programa espacial americano las usó como fuente de energía, con menos de un watt de electricidad, de la radio del satélite espacial *Vanguard I*.

Aunque se han hecho avances importantes en los últimos veinte años —el récord actual de eficiencia foto-

voltaica es de más del 30 por ciento—, su coste sigue siendo una barrera que impide su uso generalizado. Hay dos formas de rebajar su alto precio: producir materiales baratos para los sistemas de placa plana, y el uso de lentes o reflectores para concentrar la luz del Sol en áreas menores de célula solar. Los sistemas de concentración deben seguir el curso del Sol y prescindir de la luz difusa causada por la cubierta de nubes con tanta eficiencia como los sistemas de placa llana. Sin embargo, captan más luz a primera y última hora del día.

Los dispositivos fotovoltaicos que funcionan hoy son sistemas de placa plana. Algunos giran para seguir el Sol, pero la mayoría carece de partes móviles. Cabe ser optimistas con respecto al futuro de estos aparatos porque los rendimientos disponibles comercialmente están muy por debajo de los límites teóricos y porque las técnicas de fabricación apenas han iniciado su fase de aplicación.

La luz solar, el viento y la hidroenergía varían intermitentemente, con las estaciones e incluso a lo largo del día. También fluctúa la demanda de energía; sólo cabe lograr que la oferta y la demanda coincidan por medio del almacenamiento. Con la excepción de la biomasa, los sistemas solares más prometedores a largo plazo están diseñados para producir sólo energía eléctrica. La electricidad es el vehículo de la energía preferido para la mayoría de las aplicaciones estacionarias —calentar, enfriar, iluminar, en la maquinaria—, pero no es fácil guardarla en las cantidades adecuadas. Para emplearla en transporte, se requiere un medio de almacenamiento ligero de gran capacidad.

La luz solar sirve también para producir hidrógeno combustible. Las técnicas que se necesitan para hacerlo directamente (sin generar electricidad antes) están en sus primerísimas etapas de desarrollo, pero a largo plazo quizá resulten ser las mejores. Al dar la luz solar en un electrodo se produce una corriente eléctrica que divide el agua en hidrógeno y oxígeno; a este proceso se le llama fotoelectrólisis. Con la palabra "fotobiología" se describe una clase entera de sistemas biológicos que producen hidrógeno. La investigación podría conducir a fotocatalizadores con los que la luz solar divida el agua directamente en sus elementos componentes.

Cuando el hidrógeno resultante se quema o se usa para producir electricidad en una célula de combustible, el único producto secundario es el agua. Además de ser benigno para el medio ambiente, el hidrógeno proporciona una manera de aliviar el problema de almacenar la energía solar. Puede mantenerse con eficacia el tiempo que se quiera. Cuando las distancias pasan de los mil kilómetros, cuesta menos transportar el hidrógeno que transmitir la electricidad. En las islas Aleutianas se han elaborado planes para hacer electricidad con las turbinas eólicas y convertirla en hidrógeno a fin de almacenarla. Además, las mejoras de las células de combustible han permitido una serie de usos de alto rendimiento, no contaminantes, del hidrógeno; los vehículos eléctricos alimentados con él son uno de ellos.

Un cambio radical de la economía de la energía requerirá que se altere la infraestructura. El momento en que se tome la decisión de efectuar el cambio dependerá de la importancia que se le dé al medio ambiente, la seguridad de la energía u otras consideraciones. En los Estados Unidos, el destino de los programas federales de investigación de las energías renovables sube y baja como en una montaña rusa.

Actualmente, las naciones industrializadas consumen por persona diez veces la energía que se emplea en las naciones en desarrollo. Pero la demanda de energía crece deprisa en todas partes. Gracias a las técnicas solares, el Tercer Mundo podría saltarse una generación de infraestructuras y pasar directamente a una fuente de energía que ni contribuye al calentamiento global ni degrada de ninguna otra forma el entorno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STEERING A NEW COURSE: TRANSPORTATION, ENERGY AND THE ENVIRONMENT. Deborah Gordon y Union of Concerned Scientists. Island Press, 1991.

RENEWABLE ENERGY: SOURCES FOR FUELS AND ELECTRICITY. Dirigido por B. Johansson, Henry Kelly, Amulya K. N. Reddy, Robert Williams y Laurie Burnham. Island Press, 1993.

PROGRESS IN SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS. Harold M. Hubbard, Paul Notari, Satyen Deb y Shimon Awerbach. American Solar Energy Society, enero de 1994.

Fusión

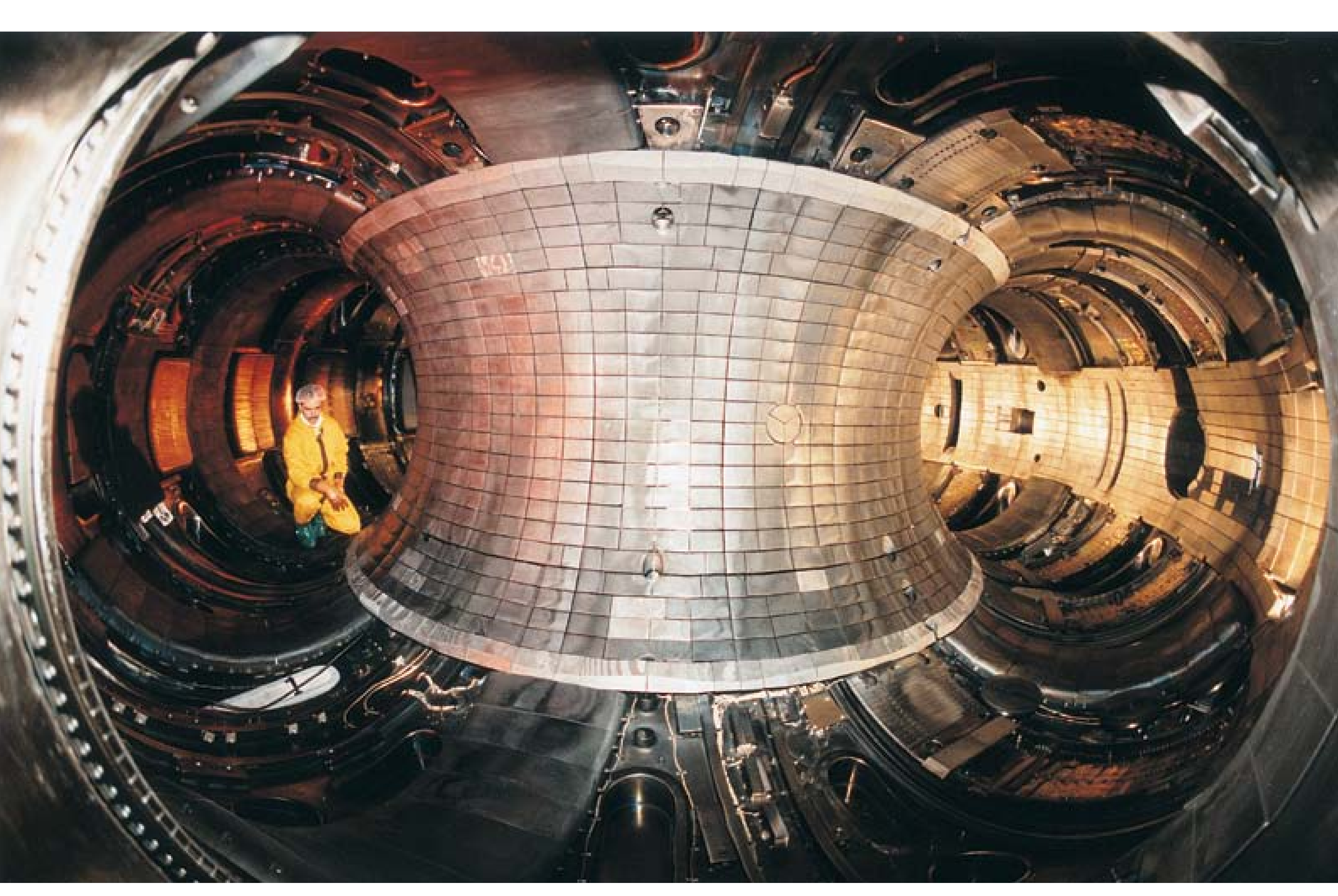
El uso de esta forma de energía podría generalizarse a mediados del siglo que viene

Harold P. Furth

En los años treinta, al descubrirse que la energía del Sol y las demás estrellas procedía de la fusión nuclear, se pensó en reproducir el proceso, primero en el laboratorio, luego a escala industrial. Como la fusión puede efectuarse con átomos presentes en el agua ordinaria, el control del proceso aseguraría a las generaciones venideras una fuente adecuada de energía eléctrica. Quizá nuestros nietos disfruten de esa prometedora realidad.

El Sol comprime con su fuerte gravedad los núcleos hasta altas densidades. Además, por ser en el astro altísimas las temperaturas, los núcleos de carga positiva tienen tanta energía que superan su mutua repulsión eléctrica y se acercan lo suficiente para fusionarse. Estos recursos no se encuentran al alcance de la mano en la Tierra. Las partículas que se fusionan con mayor facilidad son los núcleos de deuterio (D, isótopo de hidrógeno que lleva un neutrón extra) y el tritio (T, isótopo con dos neutrones extra). Con todo, para fusionar D y T hay que calentar intensamente los gases de hidrógeno y encerrarlos además el tiempo suficiente para que la densidad de partículas multiplicada por el tiempo de confinamiento pase de 10^{14} segundos por centímetro cúbico. La investigación de la fusión se ha centrado desde los años cincuenta en dos formas de conseguir ese guarismo: el confinamiento inercial y el confinamiento magnético.

El confinamiento inercial consiste en lanzar una serie de poderosos haces de láser dispuestos simétricamente sobre una cápsula esférica que contiene una mezcla de D-T. La radiación evapora el recubrimiento superficial de la pella, que estalla hacia fuera. La conservación del momento hace que la esfera interna de combustible se dis-



pare a la vez hacia dentro. Aunque el combustible se comprime sólo un breve momento —menos de 10^{-10} segundos—, en la instalación del láser Nova, en el Laboratorio Lawrence de Livermore, se han alcanzado densidades de casi 10^{25} partículas por centímetro cúbico.

Con láseres de superior energía la compresión sería aún mayor y se quemaría más combustible. Una máquina en proyecto, la Instalación Nacional de Ignición, tendrá un láser de 192 haces que aplicará una energía de 1800 kilojoules en unas cuantas milmillonésimas de segundo. La fusión liberará en esta máquina más energía que la necesaria para iniciar la implosión de la cápsula. Francia construirá un láser con prestaciones similares en 1996.

Los muchos dispositivos de fusión magnética que se han ensayado —entre ellos los esteladores ("stellarators"), los constrictores ("pinches") y los tokamaks— confinan el gas caliente ionizado, o plasma, mediante campos magnéticos. El que más éxito ha tenido y más se ha desarrollado es el tokamak, propuesto a principios de los años cincuenta por Igor Y. Tamm y Andrei D. Sakharov. La corriente eléctrica fluye por bobinas dispuestas alrededor de una cámara en rosquilla. Esta corriente actúa concertadamente con otra que pasa por el plasma para crear un campo magnético que gira en hélice alrededor del toro. Los núcleos cargados y un enjambre de electrones que los acompaña siguen las líneas del campo magnético. Este dispositivo puede confinar el plasma con una densidad de unas 10^{14} partículas de combustible por centímetro cúbico durante un segundo.

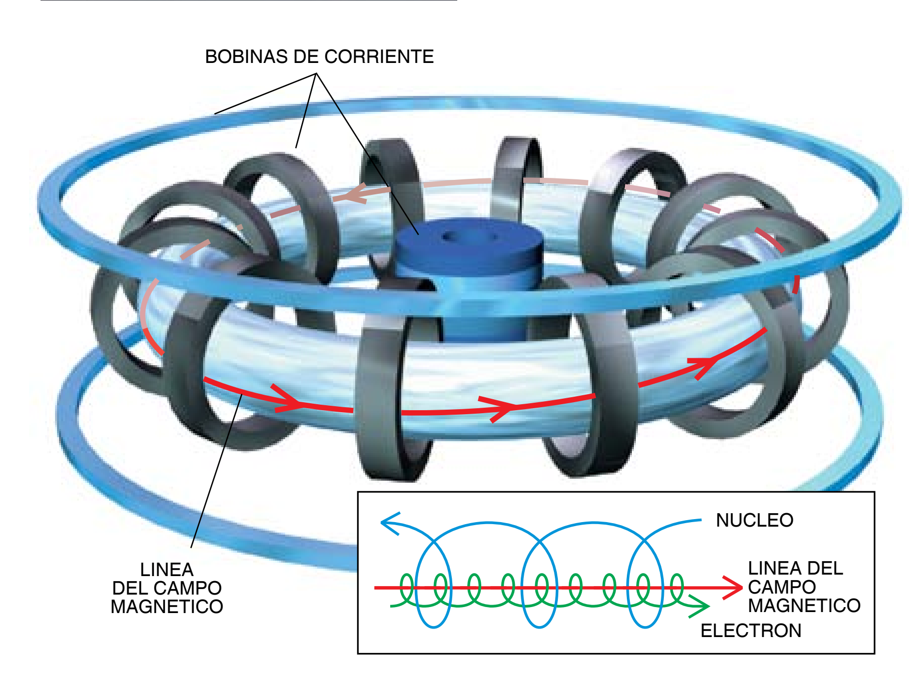
Pero el gas sólo se fusionará si se lo calienta. De la resistencia eléctrica al paso de la corriente por el plasma viene cierto calor. Pero se requiere más. Un procedimiento que se investiga en tokamaks utiliza sistemas de radiofrecuencia parecidos a los que llevan los hornos de microondas. Otro método común consiste en inyectar en el plasma haces de núcleos de deuterio o de tritio de gran energía. Los haces mantienen los núcleos más calientes que los electrones. Como los que se fusionan son los núcleos, el calor disponible se aprovecha mejor. (Este procedimiento se aparta de experimentos anteriores que intentaban imitar al Sol manteniendo las temperaturas de los núcleos y de los electrones más o menos iguales.)

HAROLD P. FURTH, enseña astrofísica en la Universidad de Princeton.

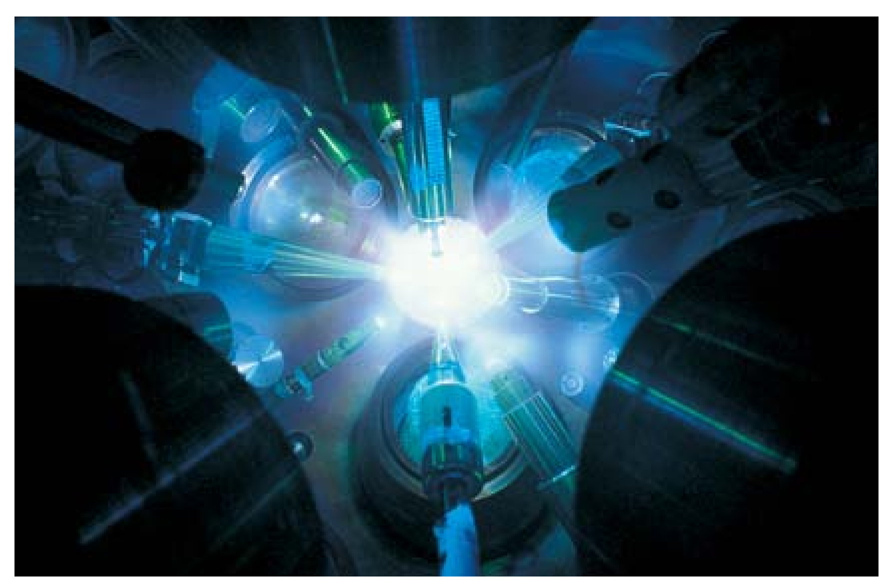
Un modo de "ion caliente" así se utilizó en 1994 en el Reactor de Fusión Tokamak de Prueba (TFTR) de Princeton, y se generaron más de 10 millones de watts de energía de fusión. La temperatura, la presión y las densidades de energía obtenidas se mantuvieron sólo durante medio segundo, pero se acercaron a las que se necesitarían en una central eléctrica comercial. En 1996, durante la próxima fase operativa del Toro Europeo Conjunto (JET), en Culham, quizá se esté cerca del punto en que se genere tanta energía como la que se introduce en el plasma. En el dispositivo JT-60U de Naka se están desarrollando inyectores de mayor energía.

Aparte de mantener caliente el plasma, está la dificultad de limpiar continuamente los átomos contaminantes que se desprenden cuando chocan los núcleos con las paredes. Varios tokamaks tienen unas bobinas magnéticas adicionales que desvían los bordes exteriores del plasma hacia una cámara donde las impurezas se extraen junto con algo de calor. Este sistema funciona bien en los experimentos actuales, donde el plasma permanece confinado breves segundos. Pero no bastará en las centrales energéticas, que generarán miles de millones de watts a lo largo de impulsos que durarán horas o días. Los investigadores del JET y del tokamak DIII-D de San Diego trabajan en ese problema.

Está al alcance de nuestras capacidades la construcción y manejo de un tokamak que mantenga un plasma estable en fusión, no durante fracciones de segundo, sino durante miles de segundos. El Reactor Experimental Ter-

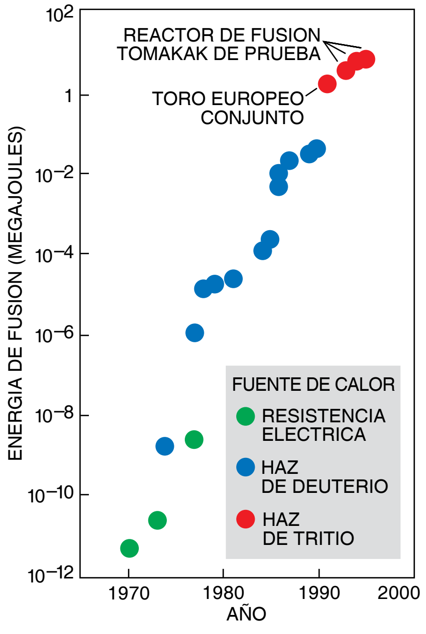


1. EL REACTOR DE FUSION Tokamak de prueba (*a la izquierda del todo*), máquina de fusión magnética de Princeton, ha logrado las mayores energías hasta la fecha. Las líneas del campo magnético confinan el combustible caliente, formado por núcleos de deuterio y tritio; las generan las corrientes eléctricas que pasan alrededor de un contenedor en forma de rosquilla (*izquierda, abajo*). Los gases calientes hacen que las paredes interiores, hechas de carbono, desprendan un resplandor rosado (*izquierda, arriba*). La franja blanca es el deuterio que se inyecta en la cámara.



2. LA FUSION POR LASER —vista aquí en la instalación Omega, de la Universidad de Rochester— se logra al comprimir una pella de combustible mediante láseres dispuestos simétricamente. Esta técnica tiene también usos militares.

monuclear Internacional (ITER), proyecto en el que cooperan la Unión Europea, Japón, la Federación Rusa y los Estados Unidos, aspira justo a eso. Se espera que ITER sea una máquina de gran tamaño; el diámetro mayor del plasma alcanzará 16 metros; irá equipado con bobinas superconductoras, instalaciones de alimentación de tritio y mantenimiento remoto. Una vez terminada la fase de proyecto, en 1998, los gobiernos participantes decidirán si se procede a la construcción.



3. LA ENERGIA que la fusión libera en los tokamaks ha aumentado. Buena parte de la mejora se debe al calentamiento del combustible mediante la inyección de núcleos de gran energía.

El ITER es una valiosa oportunidad para la colaboración internacional, pero es posible que su construcción se retrase. Mientras, los experimentadores del TFTR y de otros grandes tokamaks explorarán ideas nuevas encaminadas a la construcción de reactores menores y más baratos, y que quizás influyan en el diseño del ITER. Una de estas propuestas consiste en retorcer de forma compleja el plasma a fin de reducir la pérdida de calor. Por lo normal, el campo magnético que se enrolla alrededor del toro tiene una torsión mayor cerca del centro del plasma. Pero si la torsión disminuye en las regiones próximas al centro, el plasma será menos turbulento, gracias a lo cual se podrán mantener presiones más altas. La experimentación, junto con el análisis teórico y las simulaciones por ordenador, mejorará mucho nuestra capacidad de controlar esos procesos.

La utilización de los productos secundarios permite también atisbar la evolución plausible de los próximos 25 años. En una reacción automantenida, la pérdida de calor se compensa con la energía que genera la fusión. Los neutrones se llevan el ochenta por ciento de ésta; al ser neutros, atraviesan el campo magnético confinador. Atrapados en las paredes exteriores, los neutrones ceden su energía en forma de calor, empleada para generar vapor, que, a su vez, mueve un motor que crea electricidad. El veinte por ciento restante del calor va a parar al otro producto de la reacción de fusión, una partícula alfa: un par de protones y un par de neutrones ligados en un núcleo. Como las partículas están cargadas positivamente, los campos magnéticos las atrapan.

Las alfa van rebotando dentro del plasma, lo que calienta los electrones; los núcleos del combustible se calientan indirectamente al chocar con los electrones. Nathaniel J. Fisch y Jean-Marcel Rax sugirieron en 1992 que, en vez de malgastar una energía valiosa en los electrones, las alfa podrían amplificar unas ondas especiales que se inyectan en el plasma y canalizan la energía directamente hacia los núcleos. Concentrando así la energía en el combustible, cabría doblar la densidad de la energía de fusión conseguida.

A las partículas que se crean como productos secundarios de la fusión podría asignárseles otra aplicación muy diferente. Hace dos siglos, la revolución industrial tuvo lugar porque los caballos se negaban a entrar en las minas de carbón: los primeros motores se construyeron para sacar fuera el carbón, no para propulsar coches o aviones. John M. Dawson ha indicado que, en los próximos 20 o 30 años, mientras persiguen la producción de energía a gran escala, los programas de fusión podrían ofrecer otros beneficios. Por ejemplo, convertir los protones que se forman como productos secundarios en algunas reacciones de fusión en positrones, partículas que se emplean en aparatos de tomografía.

En esa fase de las aplicaciones especiales se explorarían abundantes ideas nuevas de la física de plasmas, que acabarían por proporcionar una visión clara del diseño futuro de los reactores.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REACTORES DE FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO. Robert W. Conn, *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1983.

AVANCES EN LA FUSIÓN POR LÁSER. R. Stephen Craxton, Robert L. McCrory y John M. Soures, *Investigación y Ciencia*, octubre de 1986.

FUSION: THE SEARCH FOR ENDLESS ENERGY. Robin Herman. Cambridge University Press, 1990.

Eliminación de los residuos nucleares

A las 3:49 de la tarde del 2 de diciembre de 1942, en un frontón readaptado, bajo el campo de deportes de la Universidad de Chicago, un físico retira unas varillas de control del primer reactor nuclear. Comienza una nueva era. Cuatro minutos y medio después, el mundo tenía sus primeros residuos nucleares. Desde entonces, al montoncito de Chicago se han sumado montañas de residuos de alto nivel: según el Organismo Internacional de la Energía Atómica, cada año se acumulan 10.000 metros cúbicos.

Esta cantidad enorme de material radiactivo no tiene un alojamiento permanente. Ni un solo país ha logrado concretar un plan a largo plazo para almacenarlo; todos dependen de medidas provisionales. En los Estados Unidos, por ejemplo, las varillas de combustible se guardan por lo general junto a un reactor, en estanques, hasta que se enfrían lo bastante para almacenarlas en seco en barriles metálicos.

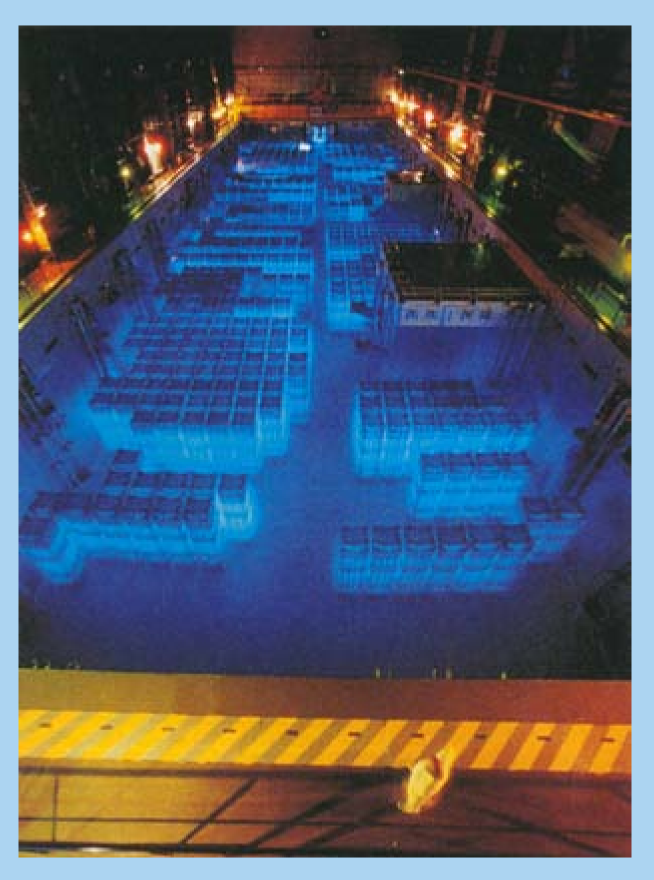
Por grande o pequeño que sea el papel que desempeñe la fisión nuclear, en la satisfacción de las necesidades futuras, poner a buen recaudo los productos secundarios radiactivos seguirá siendo prioritario, aunque sólo sea porque ya existe mucho material. Entre las técnicas más prometedoras se encuentran:

Almacenamiento subterráneo permanente. Todos los países que tienen cantidades considerables de residuos de alto nivel desean enterrarlos en áreas geológicamente estables. En la versión estadounidense de este plan, las varillas de combustible agotadas han de sellarse en recipientes de acero y enfriarse, sobre el suelo, durante varios años. Si el residuo de alto nivel está en forma líquida, se le secará y "vitrificará", o encerrará en troncos de vidrio, antes de ponerlo en los recipientes. Estos se introducirán luego en otros de hasta 5,6 metros de largo, que, a su vez, se insertarán en agujeros perforados en el suelo de roca de cuevas que harán de almacenes, a cientos de metros bajo la superficie. Los agujeros se cubrirán con tapones diseñados para proteger a la sala superior de la radiación.

Enterramiento bajo el lecho marino. Los barcos podrían arrojar bidones terminados en punta que contuviesen los residuos y que, al llegar al fondo, lo perforasen y se ahondasen decenas de metros. Las ventajas de este método dimanan de la posibilidad de usar emplazamientos del fondo del mar que son estables y caen muy lejos de los continentes. Según una variante de la idea, los bidones se arrojarían en fosas oceánicas profundas, donde el proceso geológico de subducción los arrastraría hasta el manto de la Tierra.

Algunos expertos consideran que éstas son las propuestas más sensatas, pero temen la reacción adversa del público y la posibilidad de que el plan viole los tratados internacionales que prohíben arrojar desechos radiactivos al mar.

Transmutación nuclear. Los componentes inquietantes de los residuos de alto nivel son un número más bien pequeño de materiales que se mantienen radiactivos durante decenas de miles de años. Pero si se los bombardea de forma apropiada con neutrones, se transmutan en otros que son radiactivos sólo durante cientos, o puede que sólo decenas, de años. Seguiría haciendo falta un depósito. Podría, eso sí, albergar mucho más material, pues la cantidad de calor emitida por el residuo se reduciría mucho.



ESTAS VARILLAS DE COMBUSTIBLE AGOTADAS se enfrían y blindan en unos estanques de la instalación francesa de Le Hague. El resplandor azul lo causa la interacción de la radiación del combustible con el agua.

Desde hace decenios se ha venido realizando una forma de transmutación, a muy pequeña escala, en reactores experimentales. Hace poco, el Laboratorio Nacional de Los Alamos ha propuesto un acelerador de gran energía para que el proceso sea más rápido y eficiente. Según Wendell D. Weart, del Laboratorio Nacional de Sandia, la mayor dificultad sería la concentración de los materiales nucleares. "Nadie ha intentado jamás hacerlo con el grado de separación que esto requeriría", dice.

Otras propuestas menos sólidas son:

Lanzar los residuos nucleares al espacio o al Sol. Se ha rechazado porque sería enormemente caro y hay además la posibilidad de que un cohete estalle con su carga antes de abandonar la atmósfera de la Tierra.

Almacenamiento bajo una capa de hielo polar. Los residuos de alto nivel generan el suficiente calor para fundir no sólo el hielo, sino también la roca.

Disolver los residuos en los océanos. Dispersa uniformemente por una gran parte de la superficie de la Tierra, la radiactividad sería pequeña comparada con la del nivel de fondo, insisten quienes lo proponen.

La Redacción

La ecología industrial del siglo XXI

Una industria limpia y eficiente debería imitar la capacidad de la naturaleza para reciclar materiales y no desperdiciar nada

Robert A. Frosch

El final del siglo XX asiste a un cambio sutil de talante por parte de la industria ante la cuestión ambiental. Se pasa del tratamiento o eliminación de los residuos producidos a evitar su propia existencia. Se adelanta, pues, al problema para que la sociedad no haya de enfrentarse ante una masa creciente de desechos que salen del extremo de un emisario de descarga o rebosan de un contenedor de basura. Una tendencia que se intensificará en el próximo siglo, para así distanciarse del hincapié hecho (por la industria, la legislación y las organizaciones ambientales) en la limpieza de la fase postrera del proceso.

Muchas fábricas arrojan todavía sus residuos en el "vertedero", en la "explanada trasera", del que deben hacerse cargo otras empresas. Pero en el siglo XXI la industria actuará de manera muy distinta, que evitará tener que acondicionar nuevos terrenos para enterrar los residuos, caros de mantener y limpiar.

A todos nos gustaría sacar partido de los residuos industriales. Desechar es derrochar. Es dinero que se escapa por el sumidero, en material elaborado y en energía invertida para fabricarlo. Para evitar tal derroche, los fabricantes de mañana habrán de considerar la forma de diseñar y fabricar sus mercancías de suerte tal que el control de los residuos y de la contaminación se integre en el proceso general, y no sea sólo algo en lo que pensar a posteriori. Deberán, pues, prestar atención a todo el ciclo biológico del producto, preocupándose no sólo de los materiales usados y creados durante la fabricación, sino también de su destino último, acabada su vida útil. ¿Se convertirá en un problema de eliminación o puede trocarse en fuente de material refinado y de energía?

ROBERT A. FROSCH, director adjunto que fue del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y gerente de la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio, se halla adscrito a la Escuela John F. Kennedy de Administración del Estado, de Harvard.

Nos hallamos en los inicios. En la búsqueda de nuevas vías que pudieran resultar en una revolución completa. Esfuerzos y tanteos de los que brotan nuevas ideas y nueva terminología. Los ingenieros hablaban antaño de "proyecto de fabricación" y "proyecto de montaje"; ahora menudean "proyecto de desmontaje", "proyecto de reciclado" y "proyecto ambiental", expresiones que indican que, desde el principio, comienzan a tomarse en consideración los efectos potenciales del exceso de residuos y de contaminación en la fabricación.

Superar estos problemas es en parte asunto de la técnica, de nuevas técnicas inteligentes que reciclen los residuos o reduzcan su existencia. Pero no sólo de técnicas innovadoras. Será también responsabilidad de la coordinación, más consciente, de los métodos tradicionales y del fomento de marcos legales y estructuras de mercado que permitan la innovación. Se verán en ello comprometidos los proyectos de los procesos y bienes acabados, consideraciones de índole económica y optimización de los recursos, así como la regulación y el manejo de materiales peligrosos.

Kumar Patel ha descrito un ejemplo interesante perteneciente a una empresa del sector de la microelectrónica. Los ingenieros de los Laboratorios Bell andaban preocupados por el peligro que encerraba el arseniuro de galio, una materia prima. Sorteaban el problema acudiendo a una técnica militar para el manejo de armas químicas binarias: dos sustancias químicas que, una a una, no son muy peligrosas se combinan en el ingenio bélico para producir una tercera tremendamente peligrosa. Hoy los Laboratorios Bell evitan el stock de un material muy tóxico mediante un proceso sencillo que combina sus componentes mucho menos peligrosos en el mismo punto en que se utiliza el combinado. Se trata de un sistema de entrega justo a tiempo, que acompasa la producción a las necesidades y evita excedentes. La compañía amortizó en menos de un año la inversión en nuevo equipo, al eliminar los costos adicionales de almacenar, transportar y deshacerse del compuesto peligroso.

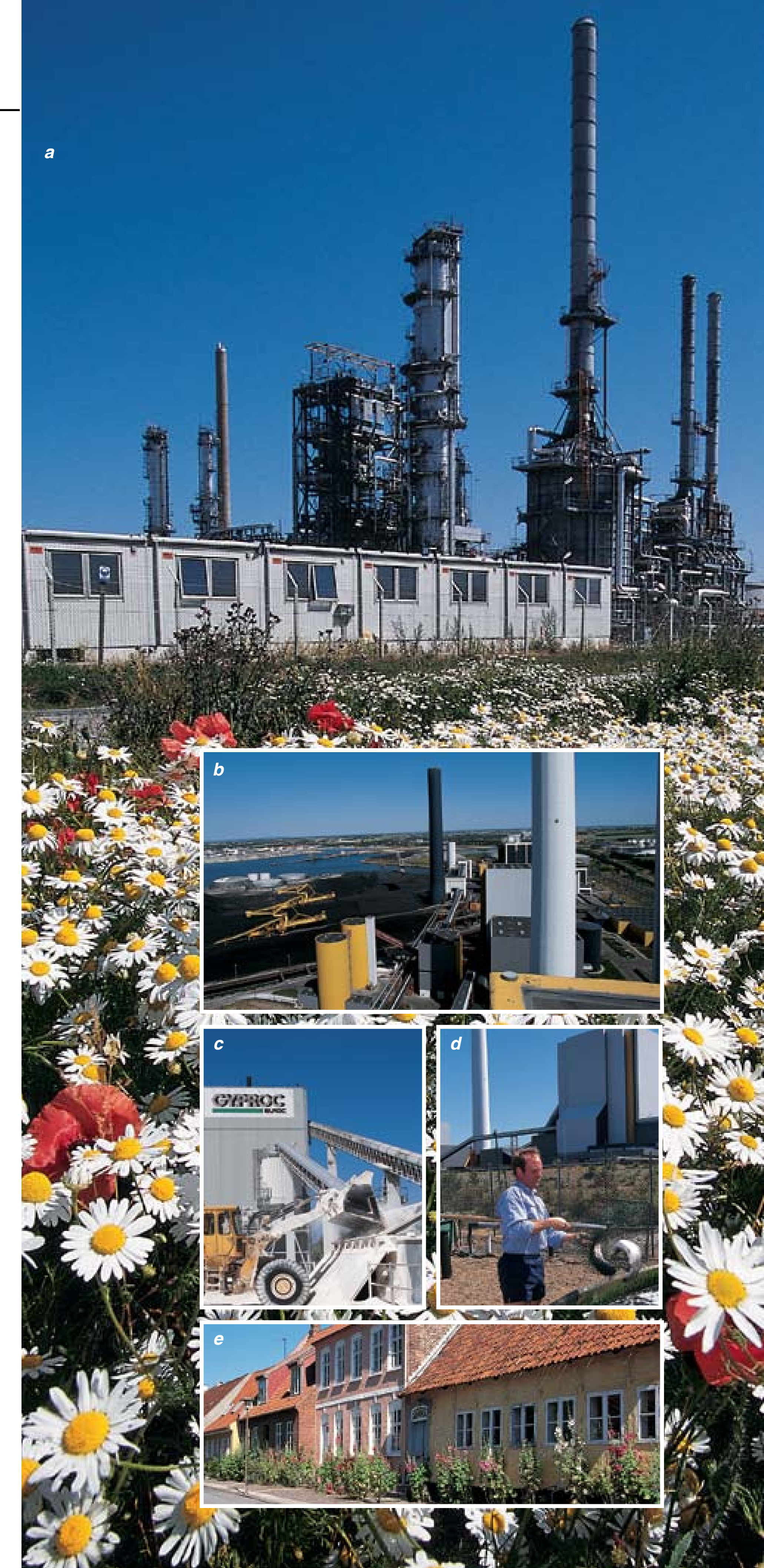
Además de resolver en lo posible el problema de los residuos dentro de una empresa, hemos de pensar en la industria del futuro a una escala global. Reflexionemos sobre el modo en que la industria en su conjunto genera residuos y contaminantes lesivos para el entorno. Si asociamos la industria a un sistema hilvanado de producción y consumo, caeremos en la cuenta de que la naturaleza nos puede enseñar muchas cosas. De esa analogía nació la expresión "ecología industrial", aplicada cada vez más a diversos conjuntos de prácticas tendentes a reducir la acción contaminadora de la industria.

El sistema ecológico natural, tomado en su integridad, minimiza los residuos. Nada, o prácticamente nada, de lo que se produce como desecho por un organismo deja de ser aprovechado por otro organismo como fuente de materia y energía. Vivos o muertos, todas las plantas y animales y sus residuos sirven de alimento para algún organismo. Los microbios consumen y descomponen los desechos, y a su vez estos microorganismos son comidos por otros organismos de la red trófica. En este maravilloso sistema natural, la materia y la energía van y vienen en grandes ciclos, pasando por una serie de organismos que interactúan entre sí.

Con esa estampa de la naturaleza por delante, se empieza a lucubrar sobre la posibilidad de entrelazar procesos industriales que generan residuos, en particular los peligrosos. Una ecología industrial avanzada no tiene por qué minimizar necesariamente los residuos de una planta o de un sector industrial, sino que debería actuar para reducir a la mínima expresión los residuos que ya no pueden aprovecharse más.

No se trata, además, de ninguna novedad. Existen compañías que trabajan, desde hace tiempo, en esa línea. Las industrias químicas y petroquímicas van probablemente en cabeza: procuran transformar hasta lo inimaginable cuanto procesan para así obtener productos útiles. Pero en el futuro los países se empeñarán en que sus empresas orienten la fabricación, los procesos y los materiales de manera que el conjunto minimice residuos y costos. Las medidas no tienen por qué resultar onerosas: una compañía adoptará un proceso de fabricación más caro si con ello evita la generación de residuos cuya eliminación debe pagar y si crea materiales para los que existen clientes.

Han de cumplirse muchas condiciones para que se consiga esta reorientación. Las empresas idearán productos susceptibles de reutilizarse si cuentan con el incentivo de mercados fiables. Muchos intentos de reciclado fracasaron porque se limitaban a acumular materiales, lo que supone un auténtico dispendio si nadie está dispuesto a sacarles partido. El mercado de los residuos requiere trasiego de información sobre quién tiene qué, quién necesita qué, quién usa qué. Una información guardada hoy bajo siete llaves, porque las empresas recelan de que se conozcan sus flujos de residuos. (Si los competidores conocieran qué subproductos se producen, podrían deducir de ellos secretos comerciales protegidos.)



1. KALUNDBORG, en Dinamarca, se ha convertido en emblema de lo que debe ser un ecosistema industrial. Una refinería de petróleo (*a*) emplea calor de desperdicio de una central energética (*b*) y vende el azufre extraído del petróleo a una compañía química. La refinería también proporcionará azufre (en forma de sulfato cálcico) a un productor de láminas de madera prensada (*c*) para sustituir el yeso acostumbrado. El exceso de vapor de la central energética calienta agua para acuicultura (*d*), al tiempo que caldea invernaderos y viviendas (*e*).

Además de necesitar una información de mercado más completa, la sociedad precisa una normativa que haga posible una auténtica ecología industrial. Con frecuencia surgen frustraciones porque las leyes industriales intentan resolver los problemas de uno en uno. El marco de disposiciones legales actual se centra en la eliminación o el tratamiento de los residuos industriales, sin considerar su posible reducción y reciclaje. Una vez clasificado como peligroso, resulta extraordinariamente difícil hacer con el residuo algo útil, aunque el material sea idéntico a un producto químico industrial "virgen", de libre compraventa en el mercado.

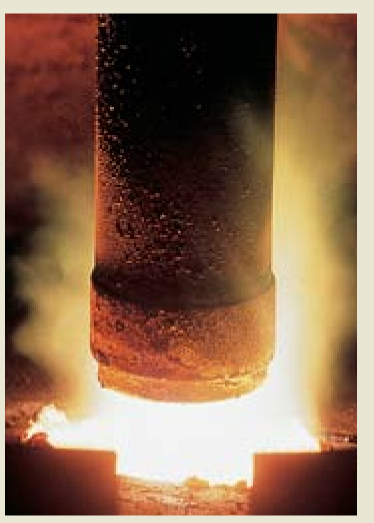
Si un fabricante produce residuos que contienen cianuro, un hidrocarburo tóxico o un metal pesado, es muy probable que la compañía se halle sometida a leyes y controles severísimos. No se le permitirá procesar este material para que dé un producto vendible, o ni siquiera transportarlo (salvo al lugar de eliminación). Pero cualquiera podrá acudir a un comercio o laboratorio y comprar cianuro, solventes de hidrocarburos o compuestos con metales pesados recién producidos. (Su fabricante posee un permiso permanente para embalar, transportar y vender estas sustancias.)

Las incineradoras definitivas

Mientras se está a la espera de que la industria desarrolle procesos eficientes, que no produzcan residuos, ¿qué hacer con la basura nuestra de cada día? La idea de cargar residuos tóxicos o de otro tipo a bordo de naves espaciales y enviarlas al Sol parecería la solución ideal. A 5500 grados Celsius, la superficie solar acabaría con todo. Pero si se considera la cantidad de desperdicios que cada ser humano produce (una media diaria de 1 a 1,5 kilogramos), esos imaginarios camiones de la basura resultan inviables.

Algunos investigadores le dan vueltas a un planteamiento antagónico: acarrear un poco de sol hasta la Tierra. ¿Cómo? Los técnicos, haciendo pasar una potente corriente eléctrica a través de un gas enrarecido, crean plasma: un gas intensamente caliente en el que los electrones se han separado de los núcleos atómicos. El plasma, a su vez, alcanza hasta 10.000 grados Celsius. (Las incineradoras habituales, que utilizan combustibles fósiles, no superan los 2000 grados C.) En presencia de este calor infernal, los hidrocarburos, PCB y otros tóxicos que salpican el suelo y las cenizas contaminadas se descomponen, produciendo escoria fundida que se endurece en rocas vítreas inertes e inocuas, óptimas para convertirse en grava de carreteras. A diferencia de sus contrapartidas al uso, que vomitan humo, las incineradoras de plasma tienen un quemado limpio, y emiten sólo la quinta parte de gases. Algunas van más allá y proponen aprovechar los gases emitidos como combustible.

Con tantas ventajas, el plasma debería haber estado cociendo desperdicios desde hace mucho tiempo. Pero hay una objeción económica. El plasma puede vaporizar residuos no peligrosos a unas 8000 ptas. la tonelada, mientras que enterrar estos residuos en vertederos cuesta menos de la mitad. Ahora bien, conforme va quedando menos espacio para vertederos y se endurece la normativa ambiental, resulta cada vez más competitiva la destrucción plasmática de residuos. Para el tratamiento de los residuos tóxicos puede ser incluso más barata. Daniel R. Cohn estima que una planta a gran escala podría operar por menos de 38.000 ptas. la tonelada, que es menos de la mitad del precio actual de eliminación de residuos peligrosos.



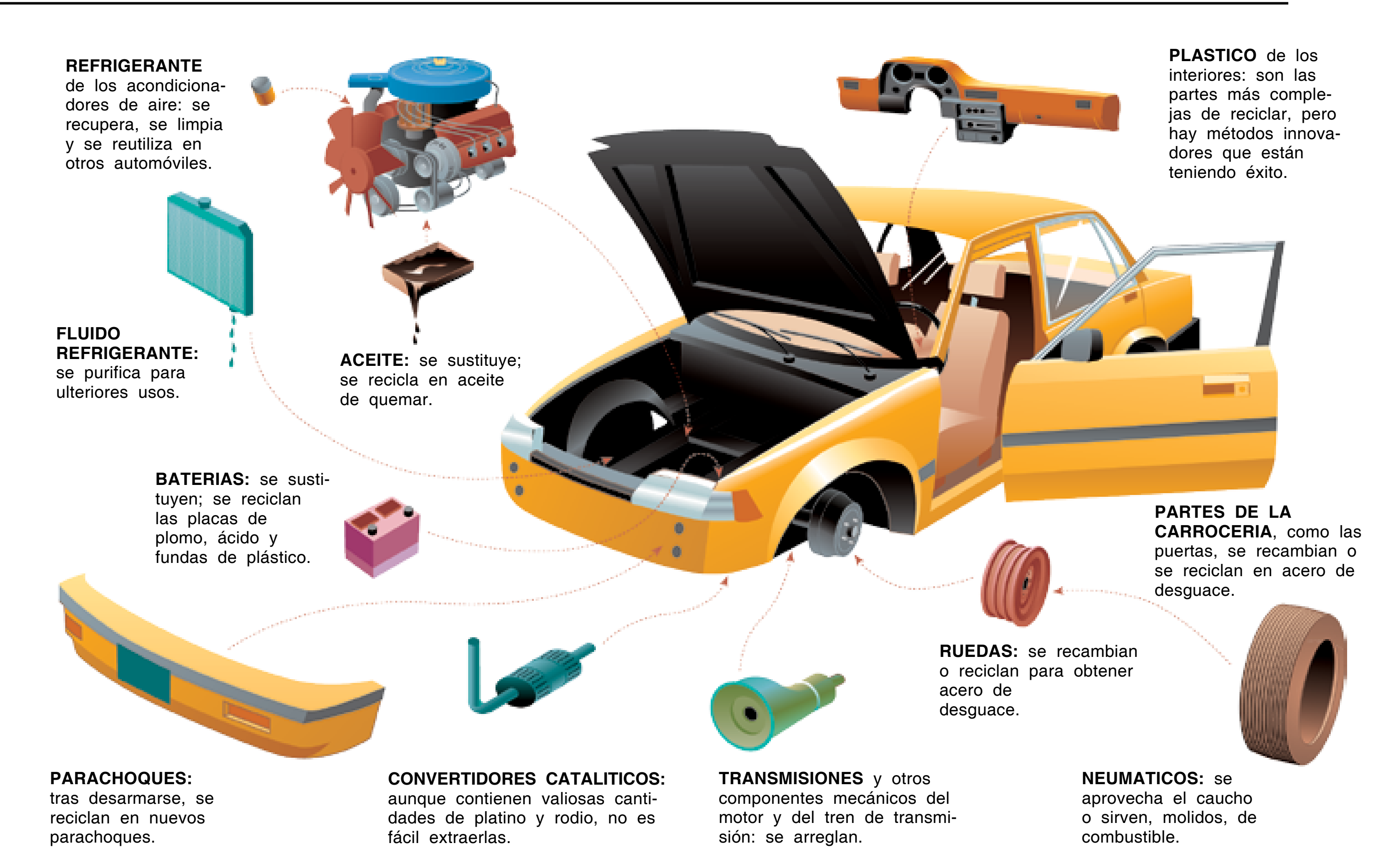
ESTE SOPLETE DE PLASMA cuece suelo contaminado, convirtiéndolo en bloques vítreos inertes.

La economía más razonable ha animado a muchas instituciones a establecer hornos piloto. "Esta técnica está comenzando a implantarse en todo el mundo", señala Louis J. Circeo, del Instituto de Tecnología de Georgia, donde se localizan algunos de los mayores hornos. Cerca de Burdeos una planta destruye amianto a un ritmo de 100 toneladas por semana. La ciudad japonesa de Matsuyama tiene unas instalaciones diseñadas para librarse de las 300 toneladas de ceniza de incineradora procedente de la combustión diaria de 3000 toneladas de residuos municipales. En el hospital Kaiser Permanente de San Diego se construye un horno que podrá quemar 12 toneladas de residuos clínicos al día.

Ni siquiera hace falta que el plasma sea caliente. Puede darse a temperatura ambiente. El equipo de Cohn está ensayando el uso de plasma "frío" para destruir vapores tóxicos. Crean ese plasma haciendo pasar un haz de electrones por un gas, proceso que separa los electrones de los núcleos y convierte el gas en plasma. Los compuestos orgánicos volátiles que atraviesan el plasma son atacados por los electrones libres, que descomponen los compuestos químicos. El año pasado los investigadores sometieron a comprobación la eficacia de su planta, del tamaño de un remolque de camión, en la Reserva Nuclear de Hanford, donde se llevan vertidos un millón de kilogramos de solventes industriales. Aspiraron parte del tetracloruro de carbono del suelo y después lo bombearon a la cámara de plasma frío, que transformó el tóxico en productos menos peligrosos, descompuestos a continuación en dióxido de carbono, monóxido de carbono, agua y sal.

Quizá se tarde todavía muchos años en desvanecer la pesadilla de los residuos y antes de que, apretando un botón, reduzcamos a la nada el contenido del cubo de la basura, pero muchos investigadores creen en las posibilidades del plasma. Sin ir más lejos, Circeo espera recabar los 1200 millones de pesetas para una planta de plasma que pueda destruir las 20 toneladas de basura diarias que los juerguistas generen en los Juegos Olímpicos de 1996 en Atlanta.

La Redacción



2. RECICLADO DE AUTOMOVILES, uno de los ejemplos de reutilización de un producto manufacturado que más éxito ha tenido. Alrededor del 75 por ciento de un coche se vuelve a aprovechar: piezas restauradas, fluidos útiles y materiales desguazados. Pero puede irse más lejos en ese proceso. Los nuevos métodos para separar y reciclar los componentes plásticos permiten eliminar todavía más material del flujo de residuos y devolverlo al ciclo de fabricación.

La industria de la automoción nos ofrece un ejemplo de particular interés sobre el tratamiento del acero. Las medidas de anticorrosión producen un fango rico en zinc que en el pasado se enviaba a una fundición para recuperar el metal y reintroducirlo en el tren de procesamiento. Pero hace unos diez años la ley incluyó, en la lista de materiales peligrosos, esos fangos procedentes de las aguas residuales del tratamiento. La consecuencia no prevista es que las fundiciones ya no podían usar los fangos, porque se habían convertido, por obra del legislador, en material peligroso. Los fangos ricos en zinc se enviaron a vertederos, con lo que se aumentaron los costos para los fabricantes de automóviles y se creó un problema de eliminación de residuos para la sociedad.

Esta situación ilustra claramente un comportamiento tan grave cuan cierto: la legislación ambiental bienintencionada puede aumentar la cantidad de residuos generados y la cuantía de los que deben eliminarse, al poner trabas insuperables para la reutilización. Más que normas ecológicas son leyes contra el reciclado. Quizá sea falta de competencia y coordinación interministerial: los suministros industriales, sean tóxicos o no, se rigen por leyes distintas de las que regulan los residuos.

La normativa habrá de cambiar a mejor en un futuro inmediato. Se avanzará también así en técnicas ambientales específicas. Quizá el paso adelante decisivo estribe en la reorganización fundamental que permita que los materiales usados fluyan libremente entre los consumidores y los fabricantes, entre una empresa y la siguiente, y entre una industria y otra. Del mismo modo que necesitamos excavar la arqueología industrial que el pasado ha dejado, también necesitamos aprender lecciones para el futuro de estos lugares espantosos, crear una visión ecológica industrial y formular un sistema de leyes y hábitos que lo permitan.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NUEVAS ESTRATEGIAS INDUSTRIALES. Robert A. Frosch y Nicholas E. Gal-lopoulos en *Investigación y Ciencia*, vol. 158, págs. 104-113; noviembre 1989.

THE GREENING OF INDUSTRIAL ECOSYSTEMS. Dirigido por Braden R. Allenby y Deanna J. Richards. National Academy Press, 1994.

INDUSTRIAL ECOLOGY: MINIMIZING THE IMPACT OF INDUSTRIAL WASTE. Robert A. Frosch en *Physics Today*, vol. 47, n.º 11, págs. 63-68; noviembre 1994.

INDUSTRIAL METABOLISM: RESTRUCTURING FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Dirigido por R. Ayres y U. Simonis. United Nations University Press, 1994.

Técnica al servicio de la agricultura

La próxima revolución verde se fundará en técnicas que aumenten el rendimiento de las cosechas sin desequilibrar el entorno

Donald L. Plucknett y Donald L. Winkelmann

Los agricultores tienen ante sí retos imponentes, los que conlleva la gestión de técnicas cada vez más avanzadas que les permitirán aumentar el rendimiento de las cosechas sin menoscabar la integridad del ambiente. Deberán superarlos los países más ricos, donde el alimento, abundante, está al alcance del bolsillo, el crecimiento demográfico es lento y hay mecanismos para resolver al menos algunos problemas ambientales asociados con la agricultura. Pero ese objetivo será una tarea titánica para el Tercer Mundo, que suma mil millones de personas más por década, cifra de los hoy allí desnutridos, y donde el capital social para la protección ambiental halla gravísimas limitaciones.

Muchas de las regiones menos desarrolladas de la Tierra se encuentran en situación crítica. En los países más pobres, la agricultura ocupa hasta el 80 por ciento de la fuerza laboral, y casi la mitad del presupuesto familiar se gasta en alimentos. En estas naciones, los ingresos sólo pueden aumentar con una mayor productividad agrícola. Los avances en agricultura se convierten así en condición para los demás objetivos sociales, entre ellos el de frenar el crecimiento demográfico.

La técnica ha sido, a lo largo de este siglo, la fuerza motriz de la agricultura. Todas las técnicas agrícolas en uso surgieron de la investigación científica. Es, pues, razonable preguntarse qué ofrecerá la ciencia a la próxima generación de agricultores y consumidores. ¿De qué manera vendrá en auxilio de los países más pobres, donde la escasez fuerza a los agricultores a poner en peligro la salud del ambiente? La respuesta se resume en estas palabras: mediante el fomento de una agricultura viable.

Por tal entenderemos, con Pierre Crosson, la agricultura que satisface las demandas crecientes en un futuro indefinido, a unos costes económicos, ambientales y sociales que sean compatibles con ingresos crecientes. Aquí nos concentraremos en unos cuantos aspectos técnicos de la misma.

Allí donde se practica la agricultura, los insectos y las enfermedades acechan y amenazan las cosechas. Menudean, asimismo, las malas hierbas, y se requiere una ingente cantidad de trabajo, realizado frecuentemente por mujeres y niños, para controlarlas. Desde los años cincuenta, tales plagas solían combatirse con la aplicación indiscriminada de potentes productos químicos. Pero la preocupación por la calidad ambiental en los países más ricos está empezando a limitar su uso. Algunos plaguicidas seguros dejarán de fabricarse porque, cuando terminen las licencias, los posibles beneficios no compensarán los costes derivados del cumplimiento de las nuevas normativas ambientales. Pero esos productos quí-

DONALD L. PLUCKNETT Y DONALD L. WINKELMANN han consagrado su larga vida profesional a la promoción de los recursos agrarios. Plucknett, antiguo profesor de la Universidad de Hawai, es presidente de Investigación y Desarrollo Agrícolas, una empresa de asesoría. Winkelmann está al frente del Comité Asesor Técnico del Grupo Consultor sobre Investigación Agrícola Internacional.



micos no son las únicas armas de que se dispone para la batalla. Contamos con una amplia gama de medidas alternativas, englobadas en lo que se denomina "gestión integrada de plagas". Se trata de conjugar plantas resistentes, rotación de cultivos, prácticas de labranza, controles biológicos y una cantidad mínima de plaguicidas.

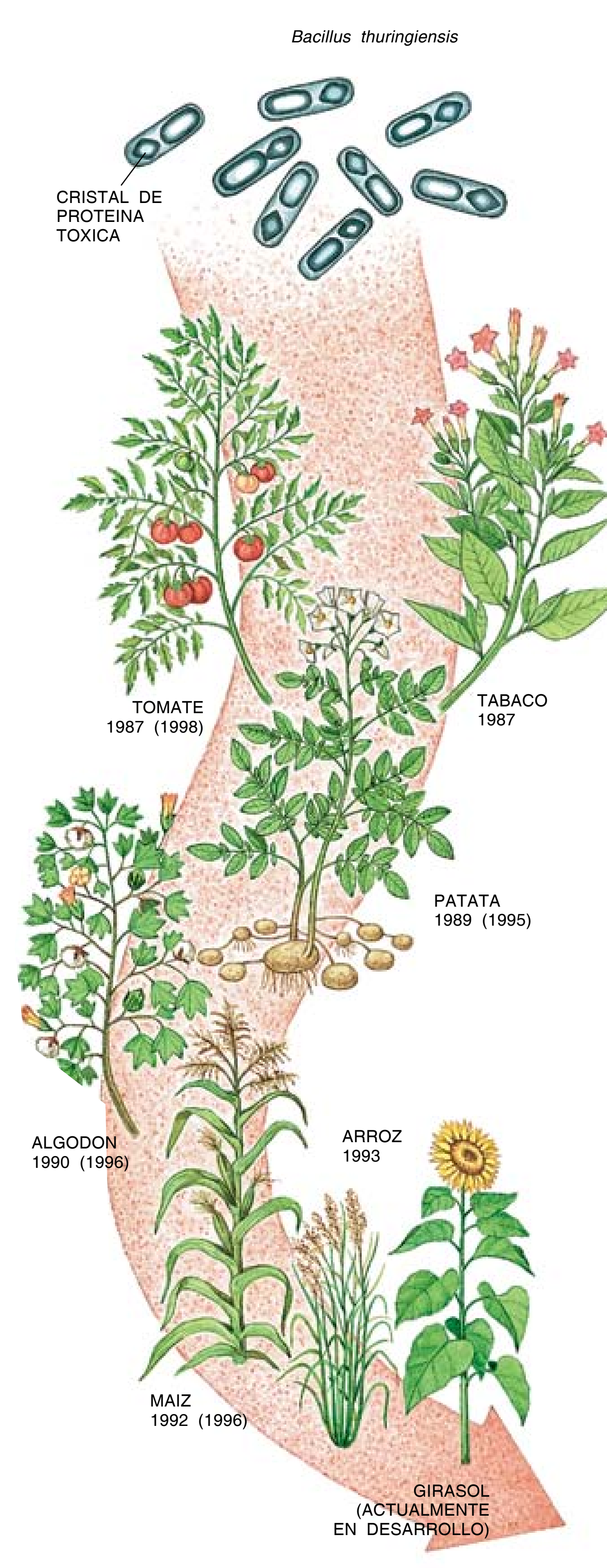
La gestión integrada de plagas se basa en el conocimiento de la biología de plantas e insectos. Se han identificado y sintetizado cientos de sustancias que atraen a éstos (feromonas), y pueden utilizarse para entorpecer el ciclo reproductor normal de las plagas; por ejemplo, promoviendo el apareamiento precoz o inadecuado de los insectos. Se prevé también introducir virus de insectos para suprimir las plagas, sin dañar a sus depredadores naturales ni dejar residuos químicos no deseados. Los avances que se avecinan harán que estas técnicas muy precisas y específicas de control de insectos lleguen a los agricultores, que podrán incorporarlas en su quehacer rutinario.

El progreso del conocimiento científico habrá de redundar en nuevos inventos que sustituyan a los plaguicidas tradicionales. Pero el éxito de las medidas alternativas requerirá asimismo replantearse las prácticas agrícolas. En principio, podrían paliarse los problemas de insectos, enfermedades y malas hierbas aumentando la labranza o eliminando los restos de cosechas, aunque ello comporta la posibilidad de mayor erosión. De ahí que la gestión integrada de plagas será una prueba creciente de la capacidad, del científico y del campesino, para anticiparse a los efectos indeseables y equilibrar lo que a veces son objetivos contrapuestos.

El éxito de la agricultura viable depende de la consecución de plantas que sean más eficientes a la hora de convertir la luz solar, los nutrientes y el agua en productos alimenticios y fibras. Los métodos de mejora tradicionales incrementan el rendimiento de las cosechas en torno a un 1 por ciento anual. Cabe esperar que la biotecnología dé un fuerte impulso a la mejora vegetal. La investigación del ADN revelará la base genética de muchas características, incluidas la sensibilidad a los insectos y a las enfermedades, la composición bioquímica y el valor nutritivo.

1. GESTION DE PLAGAS. Para muchas instalaciones agrícolas significa la aplicación de potentes plaguicidas químicos (*izquierda*), pero están surgiendo alternativas. Por ejemplo, los cultivadores de fresas de California pueden usar sistemas de aspiración montados en tractores (*abajo*) para eliminar algunos insectos.





Se podrán utilizar pruebas y marcadores genéticos para identificar fácilmente rasgos sutiles en las cosechas. La biotecnología crea híbridos insospechados mediante el cruzamiento de plantas que nunca ocurriría espontáneamente. Además, la aplicación de la biología molecular permitirá introducir directamente, mediante ingeniería genética, rasgos deseables en estirpes de plantas domésticas.

De la manipulación genética se espera que depure los métodos de selección de variedades de interés económico al permitir la transferencia directa de genes a plantas de cultivo a partir de sus parientes silvestres. Gracias a este procedimiento, habrá un progreso incesante en la mejora biotecnológica de varias plantas para que resistan enfermedades o plagas (mejora de la "resistencia de la planta patrón"), así como para que resistan el estrés de suelos muy ácidos, de la sequía o de elementos tóxicos. Además de incrementar así el rendimiento de las cosechas habituales, podrán también acrecentar la producción de tierras marginales de los países en desarrollo.

El empeño puesto en la promoción de la resistencia de la planta patrón contará con los nuevos descubrimientos que se vayan registrando en la biología molecular de los virus. Se han insertado ya genes de virus vegetales en la constitución genética de especies selectas, creando así una resistencia innata a estas enfermedades víricas en las plantas alteradas. Estas técnicas de introducción de genes exóticos en las plantas se desarrollarán sin duda en los próximos decenios.

Un precursor de las maravillas biotecnológicas que el futuro nos deparará es la incorporación de un gen de la bacteria *Bacillus thuringiensis* en diversas especies de plantas cultivadas. El gen extraño determina una toxina que confiere a las plantas resistencia ante ciertas orugas folívoras. La transferencia de rasgos a través de linajes específicos es un magnífico ejemplo de cómo la técnica mejora las cosechas sin degradar el entorno. La ingeniería genética se convertirá, sin duda, en un refuerzo vigoroso de las estrategias de selección vegetal. Ahora bien, para que los investigadores puedan mezclar y encajar genes que aumenten el rendimiento de las cosechas, necesitarán una amplia variedad de material natural con el que trabajar.

La conservación de la biodiversidad está recibiendo cada vez mayor atención; en parte ello se debe a su incidencia en la agricultura. Los centros de investigación han ido creando y engrosando bancos de plasma germinal de especies domésticas y silvestres que encierran interés económico. Tales reservorios aseguran la disponibilidad de genes apropiados para introducirlos en plantas de sembrado cuando surjan nuevos retos.

Aunque la mayoría de las plantas de valor económico pueden conservarse manteniendo sus semillas secas congeladas a unos –10 grados Celsius, hay un 10 por ciento de las plantas de interés agrícola, amén de una buena proporción de sus parientes silvestres, que no soportan esas condiciones de almacenamiento. Por consiguiente, deben protegerse en un entorno similar a su ambiente natural. También se requiere tal conservación *in situ* allí donde el número de especies de interés es elevado (plantas de praderas o de bosques tropicales). Estrategia que se impone cuando se trata de especies que desempeñan papeles simbióticos o asociativos.

2. *BACILLUS THURINGIENSIS*, una bacteria bacilar, produce una proteína que es tóxica para las orugas folívoras. Desde hace décadas los agricultores la utilizan como insecticida natural. Mediante ingeniería genética se ha introducido el gen que determina la toxina en varias plantas cultivadas. (Se indican las fechas de la demostración experimental junto a las fechas previstas para la comercialización, éstas entre paréntesis.)

La nueva ola: acuicultura

El consumo global de pescado se encuentra en el nivel más alto de los registrados, y sigue creciendo. Existe gran demanda de todas las formas de habitantes del mar, de los peces a los crustáceos. Paralelamente se asiste a un declive en las poblaciones de peces: parece que los océanos están en peligro de agotarse debido a las defectuosas prácticas de gestión que se establecieron hace décadas y a las técnicas que permiten capturas excesivas.

La acuicultura (el cultivo de determinadas especies de animales y plantas en criaderos marinos y terrestres) puede ofrecer, cuando menos, una solución parcial al problema de la caída de los recursos. Según informe del Instituto Worldwatch, las piscifactorías son ahora el origen de pescado que registra un crecimiento más rápido. En 1993, la acuicultura suministró alrededor del 22 por ciento de los 86 millones de toneladas capturadas, según un estudio reciente del Banco Mundial. Más del 25 por ciento del salmón y los camarones que son consumidos provienen de granjas. Estos éxitos ya han hecho de la acuicultura una industria de más de tres billones de pesetas. El Banco Mundial estima que la acuicultura podrá subvenir alrededor del 40 por ciento de la demanda de pescado en los próximos 15 años si los gobiernos realizan ahora las inversiones adecuadas en investigación y técnica.



GRANJAS DE ACUICULTURA: pueden encontrarse por todo el mundo. Aquí, en aguas de Mónaco, los acuicultores crían especies marinas en corrales flotantes.

Las granjas de peces, en particular de tilapia (un pez cíclido de agua dulce) y camarones, son comunes en muchos países. Entre los principales productores se cuentan China, Japón, Noruega, Israel, India, Ecuador, Tailandia y Taiwan. Muchos de estos países "reflejan unos 20 años de investigación y desarrollo e inversiones", señala Michael C. Rubino, de Palmetto Aquaculture: "Las especies tardan unos 20 años en pasar de la naturaleza al corral, por así decirlo."

Los que practican la acuicultura tienen que batallar con muchos problemas conocidos ya por agricultores y ganaderos: enfermedades, contaminación y espacio. Cuando miles de animales (ya sean peces o aves de corral) cohabitan en proximidad, se hacen muy susceptibles a bacterias y virus, que pueden infectar granjas enteras. Además, si los suministros hídricos no son limpios, la cosecha puede resentirse. Por ejemplo, según Robert Rosenberry, de Shrimp News International, la producción china de camarones cayó un 70 por ciento debido a la contaminación industrial y una gestión deficiente del agua; ello supone pérdidas por 125.000 millones de pesetas. Las granjas marinas también pueden contaminar si no hay suficiente circulación: las heces de los peces y su alimento pueden acumularse en el fondo y eliminar las comunidades bentónicas que se precisan para filtrar el agua.

La contaminación que emana de estos lugares y el trasiego de enfermedades a través de los ecosistemas han provocado el escepticismo de algunos ambientalistas, desengañados de la acuicultura. En su opinión, la contaminación no es el único problema. La acuicultura marina ha contribuido a la destrucción de los humedales costeros, y muchos están preocupados por el hecho de que peces de granja, cuidadosamente seleccionados, puedan escaparse y aparearse con poblaciones salvajes, eliminando a especies autóctonas; ello aumentaría las posibilidades de que pudieran amenazar la biodiversidad al limitar el acervo génico.

Pero todos los problemas tienen solución si los enmarcamos en la idea de una acuicultura viable. Las preocupaciones ambientales parecen compensarse con el potencial que la acuicultura tiene para reducir la demanda de pescado oceánico y, con ella, la disminución de las poblaciones salvajes.

La Redacción

Los agricultores del siglo que viene mantendrán la biodiversidad, con mayor afán que nunca, porque las aplicaciones prácticas de la misma podrían estar a la vuelta de la esquina. Pero si quieren aprovechar toda la potencia de las nuevas variedades que se creen, tendrán que preservar también la calidad de su entorno de desarrollo.

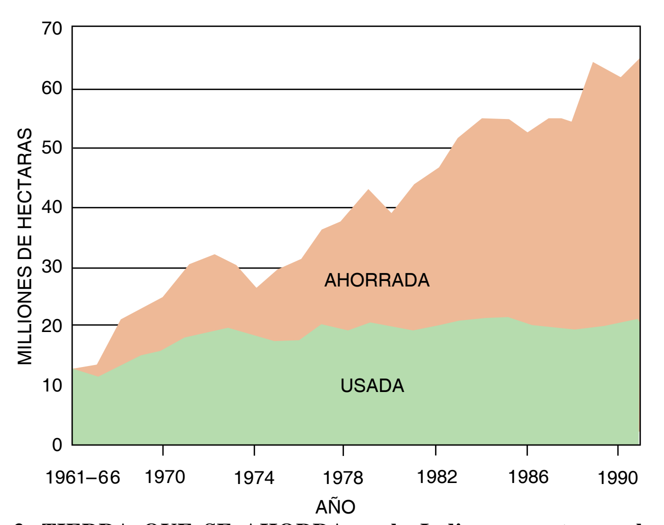
En el pasado, la mitad de las mejoras espectaculares en la producción han venido del uso creciente de abonos, plaguicidas y riego. No puede seguirse con esa fórmula indefinidamente.

Los agricultores del siglo XXI deberán adoptar una nueva mentalidad para gestionar el suelo, los nutrientes y la materia orgánica. Es ésta una norma que rige sobre todo para los campesinos del Tercer Mundo, donde el acuciante día a día gobierna la mayoría de las decisiones.

En los países desarrollados de clima templado, muchos agrónomos respiran un optimismo moderado confiados en que podrán reducir el uso de productos químicos y disminuir los costos mediante una mejor gestión de la fauna y la flora del suelo. Con la información y el cuidado apropiados, pueden acelerar la acumulación de materia orgánica y, quizá, coordinar mejor los ciclos de nutrientes con las necesidades de sus cosechas. Pero a los agricultores de países subdesarrollados de clima tropical se les plantean problemas más espinosos, a la hora de gestionar sus recursos naturales. La misma pobreza limita la preocupación por las consecuencias a largo plazo; además, las temperaturas altas y la elevada pluviosidad hacen que sea de por sí difícil proteger el suelo y el agua. Estos climas fomentan la incidencia de enfermedades y plagas, imposibles de controlar hasta ahora sin productos químicos muy activos, agentes que acaban por atentar contra la calidad del suelo.

La investigación proporciona una mejor comprensión de la biología y la ecología de las explotaciones agrícolas tropicales (la biota del suelo, los requerimientos de nutrientes para las plantas, las interacciones con los insectos y los patógenos). La consecuencia debiera ser el sugerir prácticas viables. Con el tiempo, la gama de avances posibles instados por la ciencia debiera ser enorme. Sin embargo, en muchos casos los campesinos viven aherrojados en su pobreza e ignorancia y no se atreven a adoptar métodos nuevos.

Las sociedades preocupadas por la protección del ambiente han de encontrar los incentivos que muevan a los agricultores a adoptar medidas conservadoras de los recursos. El respaldo de la administración y el ofrecimiento de créditos asumibles podría servir de acicate para dar el paso hacia una agricultura viable. Dichos cambios mejorarían muchísimo las perspectivas de los campesinos en las naciones en desarrollo. Pero allí también es preciso que las inversiones sociales vayan de la mano de la investigación: las dificultades a las que se enfrenta la ciencia para diseñar prácticas de gestión agrícola apropiadas y efectivas en los países atrasados son todavía inmensas.



3. TIERRA QUE SE AHORRA en la India; aumenta con la mejora en la producción de las variedades de trigo. La banda superior (*naranja*) representa el área creciente que habría tenido que dedicarse a la agricultura en el supuesto de que la producción se hubiera mantenido en los niveles de los años sesenta. El uso real a lo largo de tres décadas se indica en verde.

La agricultura del siglo XXI verá toda una gama de instrumentos diagnósticos novedosos que llevarán el poder de la ciencia moderna a todos los niveles de la toma de decisiones. Se podrá disponer de equipos portátiles de pruebas biológicas para identificar *in situ* virus y otras enfermedades, acercando así la biotecnología hasta el mismo surco del sembrado. Aunque estas innovaciones aparecerán primero en países ricos, abundarán las posibilidades de aplicación en las naciones pobres, que de ese modo gestionarán mejor sus cosechas.

Un avance notable en la técnica agrícola será el de sistemas informáticos expertos que, combinando los resultados de distintas disciplinas, guiarán las actuaciones de los agricultores. No es un futurible. Se están desarrollando ya varios "sistemas de apoyo a las decisiones" para facilitar a los hombres del campo la gestión del suelo. Los sistemas más avanzados se aplican a la resolución de los déficits de fósforo y de la acidez elevada, pero hay otros en perspectiva. Estas aplicaciones informáticas no se limitan a presentar un análisis experto de lo que se sabe y el efecto que podría producir determinado tipo de gestión, sino que permiten también acotar lo que no se sabe y podría resolverse mediante un ulterior acopio de datos.

La potencia de los sistemas expertos reside en su capacidad para conjugar principios científicos con la experiencia acumulada por el campesino. Pero son limitados, y quizá no pueden dar una respuesta fiable ante una situación que evoluciona rápidamente. Otro enfoque, que implica simulaciones numéricas, puede habérselas mejor con efectos que cambian continuamente, tales como el tiempo meteorológico. Hoy se pretende integrar sistemas expertos y modelos de simulación. Mientras se consigue, los agricultores usarán cada vez más los ordenadores para controlar las plagas, ahorrar agua y gestionar siembras distintas.

En los próximos decenios, conforme vaya ideando nuevos aperos para el campo, la ciencia irá tomando el mando y dirigirá las prácticas obligadas en una agricultura viable. En los países desarrollados, los avances científicos promoverán una mayor producción y costos más bajos, ayudarán a proteger la tierra y el agua y, de este modo, asegurarán los suministros adecuados de alimentos y fibras para el próximo siglo. En los países más pobres, las técnicas con base científica serán, sin duda, de más difícil introducción. Sin embargo, serán allí todavía más decisivas para encarrilar la producción agrícola marginal, frenar la destrucción ambiental y remediar la pobreza.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EX SITU CONSERVATION OF PLANT GENETIC RESOURCES: GLOBAL DEVELOPMENT AND ENVIRONMENTAL CONCERNS. Joel I. Cohen, J. Trevor Williams, Donald L. Plucknett y Henry Shands en *Science*, vol. 253, págs. 866-872; 23 agosto 1991.

CULTIVOS TRANSGÉNICOS. Charles S. Gasser y Robert T. Fraley en *Investigación y Ciencia*, vol. 191, págs. 64-70; agosto 1992.

LA DIVERSIDAD DE LA VIDA. Edward O. Wilson. Crítica, Barcelona, 1994.

HOW MUCH LAND CAN TEN BILLION PEOPLE SPARE FOR NATURE? Paul E. Waggoner. Council for Agricultural Science and Technology Report, n.º 121; febrero 1994.

Hacia una ecología económica

Los países pueden prosperar al tiempo que protegen su ambiente

Heinrich von Lersner



Encargado de ocuparme de la salud de las tierras, el aire y el agua de Alemania, he descubierto lo que cualquiera relacionado con el ambiente conoce: es difícil predecir el futuro. No obstante, parece relativamente fácil vaticinar que los avances técnicos resultarán cruciales para proteger el planeta.

Para proteger el entorno hay que empezar por mejorar la generación y transformación de la energía. Aquí los avances han sido muy rápidos. Podemos encontrar casas que obtienen su energía exclusivamente del sol, y parece probable que la tendencia hacia las viviendas autosuficientes continuará en el futuro. Junto a este progreso, las mejoras en el transporte habrán de reducir de forma drástica el número de vehículos a motor privados que corren por nuestras autopistas. Este cambio rebajará todavía más el consumo total de energía.

Lo mismo que el petróleo, el agua dulce se convertirá en un bien muy apreciado. Por ello, se pondrán a punto nuevos métodos para que la industria trabaje con una menor cantidad de agua, contaminándola menos y reciclándola más. A este respecto, el sector textil de Alemania ha adoptado equipos que filtran los aditivos químicos del agua residual. Puesto que tanto lo filtrado como el agua se vuelven a emplear, el esfuerzo no sólo respeta el ambiente, sino que resulta también económico; en 18 meses se amortiza el equipo controlador de la contaminación.

Pero las graves dificultades que nos aguardan no dimanarán tanto de la industria cuanto de la agricultura. Para las poblaciones de regiones áridas, será imprescindible crear plantas desalinizadoras del agua, transportarla a grandes distancias y regar con ella, al tiempo que se evita una evaporación derrochadora. Avances técnicos que pueden ayudar a recuperar tierras de cultivo.

HEINRICH VON LERSNER es presidente de la Umweltbundesamt, el ente alemán de protección ambiental.

Con la tierra y el agua del planeta, debe preservarse también la atmósfera. Apenas se han dado los primeros pasos en este terreno. Los signatarios de los acuerdos de la Convención de Río sobre limitación de emisiones de gases de invernadero se reunieron en la primavera de 1995 en Berlín para desarrollar el tratado. Aunque no se consiguió una ley internacional satisfactoria, la convención dio pleno respaldo a la búsqueda de nuevos métodos que puedan estabilizar la producción de dióxido de carbono en el mundo desarrollado y evitar su rápido crecimiento en los países menos industrializados.

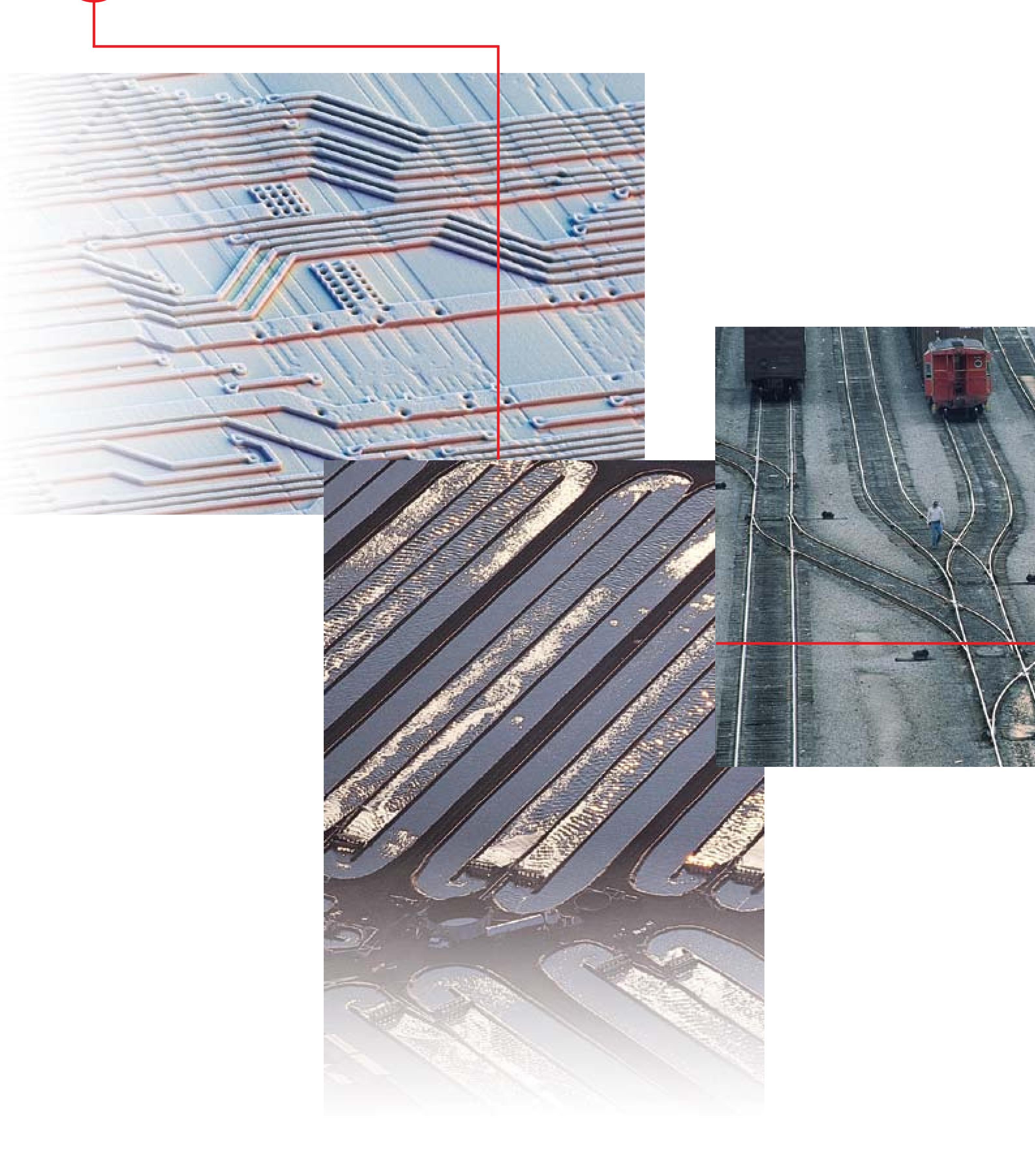
Las mejoras técnicas han de proteger el ambiente de los ataques que recibe y han de servir para remediar las negligencias del pasado. En Alemania, como en otros muchos países desarrollados, la sociedad ha heredado cargas pesadas: el manejo incompetente de los residuos peligrosos. Gran parte de nuestro suelo está cargado de sustancias químicas que no puede degradar, y ahora estas sustancias están contaminando nuestros alimentos y nuestras aguas. En los últimos años el gobierno alemán se ha esforzado por hacer frente a ese oneroso legado mediante una serie de técnicas para la limpieza del suelo contaminado, que incluyen métodos biológicos y térmicos para la degradación de las toxinas.

Aunque en muchos aspectos tienen éxito, los trabajos de descontaminación resultan lentos y caros. Las sustancias destinadas a la eliminación en el siglo XXI deberán cumplir criterios estrictos. Por ejemplo, el pretratamiento de los residuos, antes de su eliminación, mediante procesos térmicos que combinen la carbonización a bajas temperaturas y la incineración a temperaturas elevadas.

Pero no bastarán, por sí solos, unos mejores programas de eliminación para resolver el problema fundamental de los residuos. Los fabricantes habrán de producir artículos que aseguren, de principio a fin, un ciclo respetuoso con el entorno. La "fabricación cerca de la forma neta" y otros métodos avanzados reducirán los residuos al limitar la cantidad de horas de máquina que las partes especializadas precisarán. Los artículos complejos se fabricarán de forma modular para que puedan retirarse sus componentes cuando el producto termine su vida útil; las piezas modulares se marcarán para su identificación electrónica y posterior reciclado. A su vez, progresará la técnica de separación de materiales mezclados, y la producción fabril será cada vez más eficiente en su uso de materiales reciclados.

La situación en Alemania sirve para demostrar que las naciones más prósperas desde el punto de vista económico y ecológico son las que se rigen por una economía libre. Pero estos lugares sólo continuarán prosperando si los industriales, los comerciantes y los consumidores tienen todos como prioridad actuar de una manera ecológicamente responsable. En realidad, los países avanzados que puedan mantener un crecimiento económico continuado y, a la vez, una administración ambiental prudente en el siglo XXI, servirán de ejemplo obligado para el resto del mundo. Con el crecimiento de la población y su demanda de recursos en aumento, la protección ambiental habrá de enfrentarse a múltiples dificultades. Pero, recordando una expresión de Russell Train, en el futuro la mayor demanda no será de carbón, petróleo o gas natural; será del tiempo que necesitaremos para adaptar nuestras leyes, comportamientos y técnicas a las nuevas exigencias.

CONVIVIR CON LAS NU





EVAS TÉCNICAS

La técnica no sólo no resolverá todos nuestros problemas, sino que incluso podría crear otros nuevos. Pese a tales limitaciones, nos ofrece, sin embargo, mejores formas de trabajo, ocio y organización de nuestra vida.

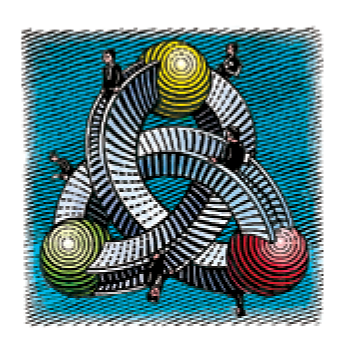
COMENTARIOS

Indice

Infraestructuras para la técnica

Los avances industriales dependerán de la fijación de nuevos patrones

Arati Prabhakar



Las infraestructuras son los cimientos. Abarcan la red de carreteras, los tendidos de distribución eléctrica, los sistemas de comunicaciones y otras instalaciones básicas. Son cosas que damos por supuestas, al menos mientras funcionan. Al hallarse muchas veces lejos de nuestra perspectiva, su papel esencial tiende a desaparecer de la mente. Así debe ser, además. Pero conforme avanza la técnica, las infraestructuras deben también evolucionar.

La revolución de la información y el establecimiento del mercado global exigen un conjunto creciente y plural de técnicas de infraestructura. Cuando, al doblar el siglo, se fundó en los EE.UU. la Oficina Nacional de Patrones —hoy Instituto Nacional de Patrones y Tecnología (NIST)— se le asignó la misión de crear patrones de medida que permitiera la producción eficaz y en masa de bienes, automóviles por ejemplo. Las normas actuales relativas a la industria de automoción van ahora mucho más allá de los tamaños de piezas intercambiables. Para analizar la composición química de los gases de escape, se requieren muestras normalizadas de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno; los termopares, que proporcionan las lecturas de temperatura al controlador regido por microprocesador del motor, deben construirse de acuerdo con especificaciones estrictas para que sus indicaciones sean exactas.

En un decenio, la infraestructura automotriz habrá ampliado su campo. Con toda probabilidad, los coches se proyectarán y fabricarán siguiendo especificaciones normalizadas de intercambio de datos del producto (PDES). Mediante redes de ordenadores, los anteproyectos digitales pasarán, cual testigos en una carrera de relevos, del proyectista al ingeniero para simular resultados y prestaciones de los componentes antes de fabricar el coche. Los formatos normalizados para esas especificaciones favorecerán unas rutinas de fabricación más ágiles, posibilitando, sin elevar demasiado los costes, la producción de más modelos construidos a gusto del cliente.

Los futuros automóviles pueden incorporar piezas realizadas con materiales compuestos (“composites”), esto es, mezclas de polímeros y refuerzos de cerámica, sustitutos que tienen la resistencia del acero y son mucho más ligeros. Ello comporta vehículos limpios y ahorradores en consumo. El problema reside todavía en su precio, altísimo. En Estados Unidos el Programa de Tecnología Avanzada (ATP) se propone desarrollar materiales compuestos de altas prestaciones y coste moderado.

Mirando hacia un horizonte todavía más lejano, un amplio muestrario de potentes sensores, ordenadores y equipos de comunicación pueden formar el sistema nervioso de coches, carreteras, puentes y sistemas de ordenación del tráfico. Algunas de esas innovaciones pueden ser el resultado de pastillas de nuevo cuño que requerirán técnicas de infraestructura novedosas. Las pastillas de los microprocesadores, por ejemplo, tendrán pronto componentes de unos 0,25 micrometros de tamaño, lo que los coloca en el dominio de los grandes virus. Las innovaciones en microlitografía y otras técnicas de microfabricación pueden pronto rebajar esa escala a 0,1 micrometros o menos, punto en el cual se necesitarán nuevos dispositivos de medida.

El NIST ha iniciado ya los ensayos con la Máquina de Medida Molecular o M^3, un equipo preparado para cartografiar detalles subatómicos de una superficie del tamaño de una tarjeta de crédito. Dotados con la M^3, los fabricantes de semiconductores podrán comparar sus medidas con referencias que tienen error inferior a 2,5 nanómetros (la longitud de ocho moléculas de agua colocadas en hilera). Tal precisión aliviará el tenaz empeño en reducir el tamaño de los circuitos integrados y aumentará la potencia de los dispositivos que los contienen.

El NIST ha venido trabajando en los equipos y la programación del M^3 desde 1987. Para minimizar los errores por vibraciones o cambios de temperatura, la sonda que constituye el corazón del instrumento —un complicado microscopio de barrido y efecto túnel— está alojada en el interior de una esfera de cobre del tamaño de un balón de baloncesto; esta esfera anida, a su vez, dentro de una serie de recubrimientos de tamaño creciente. Un sistema informático usa interferómetros láser, un carrillo deslizante meticulosamente construido y elementos piezoeléctricamente flexibles para producir traslaciones controlables de sólo 0,075 nanómetros (menos que el tamaño de un átomo de hidrógeno). Para verificar el comportamiento de la máquina frente a esos movimientos sutilísimos, el usuario se apoyará en una nanorregla: una superficie atómicamente lisa de un cristal, de diseleniuro de tungsteno quizá. La distancia medida entre dos átomos de este cristal sirve de graduación de la regla. Además, y a imagen del tablero para el mecánico de nuestro tiempo, la superficie plana del cristal puede servir de referencia geométrica de exactitud ultra-alta para M^3.

En viajes largos por carretera, podemos entretener los niños con equipos de electrónica y comunicaciones fabricados con la ayuda del M^3. A ese efecto, la infraestructura del siglo venidero incorporará la normalización de vídeos digitales, para la emisión de programas interactivos y difundidos en complejas redes de información. ATP se propone también reunir a cuantos jugadores desean que estas ideas se conviertan en realidad.

La lista continúa. Se investiga en sistemas de identificación de huellas digitales o caras que permitan encerrar su coche rápida y fácilmente sin llave. Tales sistemas, sin embargo, necesitarán complicados algoritmos: por ejemplo, deberán reconocer la misma huella digital aunque su apariencia varíe de una impresión a otra. Los vendedores y

los compradores necesitarán referencias normalizadas para comparar el comportamiento de esos futuros programas informáticos. Habrán de crearse patrones normalizados para juzgar la calidad de laboratorios que realicen pruebas genéticas y otros análisis de interés biológico. Métodos que sin duda serán pan diario en los laboratorios clínicos del siglo XXI.

ARATI PRABHAKAR dirige el Instituto Nacional de Patrones y Técnica de Gaithesburg, Maryland.

Proyectar el futuro

Quienes idean los productos no deben ignorar la psicología del usuario

Donald A. Norman



La dificultad de programar el vídeo doméstico se ha convertido en motivo de chanza. "Soy especialista en cohetes", se me quejaba un ingeniero. "Proyecto sistemas de misiles, pero no consigo programar mi vídeo." ¿Por qué algunas veces parecemos tan torpes en el manejo de objetos que se suponen elementales, como puertas, interruptores de luz, grifos y termostatos, por no mencionar ordenadores y equipos automatizados? No hay que culpar al infeliz usuario, sino al proyectista del aparato que no se molestó en ponerse en la piel de aquél. Los pasos requeridos para poner en marcha ciertos equipos modernos parecen a menudo arbitrarios y caprichosos.

Aunque la mayoría de los problemas surgen en relación con equipos electrónicos, ciertos defectos fundamentales de proyecto se pueden ilustrar mediante objetos mecánicos simples. Consideremos una puerta cerrada. Por lo común, sólo cabe dos acciones: empujar o tirar. Pero, ¿cuál? ¿por dónde? Las puertas mal ideadas convierten la operación en un juego de adivinanza, que obliga a veces a indicar el movimiento apropiado. Supongamos ahora que una puerta tuviera una chapa metálica en un lado. Por sí misma, la chapa nos está diciendo "Empuje aquí". No dudaríamos un segundo, porque el fabricante ha incluido una pista visible sobre el funcionamiento de la puerta. Las mejores pistas ofrecen siempre una indicación intuitiva sobre lo que uno puede hacer con un objeto. Cuando algo necesita rotularse, lo mismo sea una puerta que un fogón de cocina, es señal de fallo de proyecto. Espléndidas posibilidades carecen de sentido si son difíciles de descubrir y ejecutar.

Pero la aportación de pistas inequívocas es sólo un aspecto de un buen diseño. Hay otros principios concatenados a tener en cuenta. Primero, manejamos mejor las cosas cuando entendemos la lógica subyacente. Los proyectistas pueden hacer llegar esta información ofreciendo a los usuarios un "modelo conceptual" de operación del objeto. Los ordenadores acostumbran ahora a rotular la información almacenada como si estuviera guardada en archivadores y carpetas, como si las unidades centrales de proceso contaran con muebles archivadores donde las carpetas se colgaran de una guía. Ni que decir tiene que no hay tal cosa en las entrañas del ordenador, pero el modelo facilita la comprensión, por el usuario, de la reserva y recuperación de los documentos.

Segundo, cada operación debería ir seguida de algún tipo de realimentación que avisase que la maniobra se había realizado con éxito, aun cuando el resultado no se manifieste de inmediato. El reloj, de arena u otro, que aparece en la pantalla del monitor sirve para señalar que se ha entendido la orden y que sus instrucciones tardarán algún tiempo en ejecutarse.

Por último, hay que poner en correlación espacial los mandos de la máquina y sus efectos. En cocinas pensadas como es debido, si los fogones se disponen en rectángulo, también los mandos deberían ajustarse a esa figura, de suerte que el mando inferior izquierdo corresponda al fogón izquierdo de abajo, y así los demás. Ocurre, por contra, que la mayoría de las cocinas tienen los fogones dispuestos rectangularmente, mientras que los mandos están en línea: no es de extrañar que los usuarios se equivoquen, pese a los rótulos.

Conforme va penetrando en nuestra vida la automatización, se hace más urgente la necesidad de aplicar tales principios. Antaño, la técnica era de naturaleza mecánica. Todo estaba construido con palancas, engranajes, ruedas dentadas y ruedas. Quienes manejaban las máquinas podían ver muchas de sus partes y observar el resultado de su acción. Se confiaba en entender cómo funcionaba la maquinaria grande y los aparatos pequeños, porque sus componentes eran visibles. Por contra, el funcionamiento de las máquinas modernas y los principios en que se basa su diseño permanecen escondidos y abstractos. No se ve nada ni nada facilita su comprensión. Por eso, los operarios saben cada vez menos acerca del funcionamiento interno de los sistemas que manejan, y se encuentran en franca indefensión cuando surge un problema.

Tal alienación produce efectos alarmantes. La mayoría de los accidentes industriales y de aviación se atribuyen a errores humanos, a no saber manejar los equipos. Muchos fabricantes —y gran parte de la sociedad— continúan en esos casos siguiendo la filosofía de "echar la culpa y adiestrar"; tras responsabilizar al operario, se insiste en su adiestramiento. Mucho mejor sería reproyectar los aparatos de suerte que, de entrada, se redujera al mínimo la probabilidad de error. Además, la maquinaria debería garantizar la fácil detección de los errores cometidos y su enmienda antes de que produzcan daños. La mayoría de los técnicos carecen de la formación adecuada o el conocimiento necesario para proyectar tales sistemas resistentes al error. Para llenar este vacío, ha surgido una disciplina

en el seno de las ciencias cognitivas denominada ergonomía o ingeniería cognitiva. Se ocupa de los aspectos mentales de proyectos y construcciones.

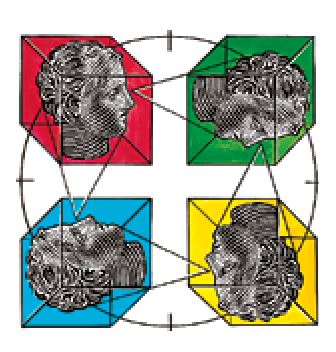
Nos encontramos en medio de una arrolladora transformación técnica. Pero la revolución es también humana y social. Los grandes avances prometidos en conocimientos, comunicaciones, trabajo cooperativo, educación y ocio sólo cristalizarán si la técnica logra adaptarse a las necesidades y aptitudes de sus usuarios. Para ello es necesario conocer el factor humano, e invertir la tendencia que obliga a las personas a adaptarse a la técnica. Ha llegado la hora de que la técnica se adapte al usuario.

DONALD A. NORMAN es profesor emérito de ciencia cognitiva en la Universidad de California en San Diego.

Alfabetización digital

Los multimedios requerirán igual facilidad en la palabra, imagen y sonido

Richard A. Lanham



Analfabetos eran los que no sabían leer ni escribir. En nuestra era digital se consideran tales los que no comprenden la información, cualquiera que sea la forma en que se presente. Las letras negras impresas sobre fondo blanco van cediendo paso a un nuevo formato, que combina palabras con sonidos e imágenes, en rica y etérea mezcla. Aunque esos ingredientes, llamados multimedios, no constituyen ninguna novedad, la receta sí lo es.

También lo es la intrínseca volatilidad de la mixtura. La imprenta apresa las palabras, que quedan congeladas en la página. Esa cristalización les confiere autoridad y, a veces, inmortalidad. Por eso nuestro aprecio, nuestra voluntad de poner las cosas "negro sobre blanco", de escribir un soneto, en palabras de Horacio, "más duradero que el bronce". La presentación en multimedios devuelve las palabras al tiempo efímero: el lector puede cambiarlas, alterar su forma y tamaño, transformar las imágenes, sonidos y palabras. Y sin embargo, al final de todas esas variaciones, podemos reclamar el original con una simple pulsación.

La educación impresa fijaba la información; la educación en multimedios combina cristalización y novedad en una fértil oscilación. En un universo digital podemos comernos el pastel sin deplorar su pérdida: tras digerirlo, lo conservamos. Más: podemos incluso regalarlo, pues la clave digital puede reproducirse sin consunción.

Los libros impresos crearon la noción de "propiedad intelectual". Fijados en su forma y difíciles de reproducir, podían venderse y poseerse, asegurando el sustento de autores e impresores. Pero esa estructura de la propiedad intelectual se diluye en cuanto la trasladamos a los multimedios. Habrá que inventar un nuevo andamiaje protector. Hay, además, otro aspecto en que la flexibilidad digital se muestra en toda su radicalidad. Si preguntamos, mirando a través de la lente gran angular de la historia cultural occidental, qué aporta ser ilustrado en multimedios, aparece una respuesta asombrosa: aprehende la expresividad de las culturas orales, que manuscritos y libros habían excluido.

Al escribir este texto, por ejemplo, me he esforzado por crear una "voz parlante" de confianza para convencerle de que soy una persona ponderada. Imagínese ahora que pudiera usted pulsar un "icono de autor". Aparecería mi imagen en movimiento, andaría hasta el margen y empezaría a hablar, razonando mi tesis, subrayándola con mi voz, gestos y traje. ¿Qué es lo que ha cambiado? Han vuelto muchos de los recursos de los que nos valemos en la cultura oral, los juicios estilísticos intuitivos de los que dependemos. El lector puede verme y oír mi voz. Puede introducir mi voz en la prosa muda y animarla así. Sin que desaparezca el escrito. El lector contempla al autor en profundidad estereoscópica, hablando en un espacio escrito y oral.

Las culturas orales y las que se sirven de la escritura se rigen por reglas muy distintas. Observan diferentes sentidos del tiempo. Las orales prolongan el discurso —las interminables arengas de Fidel Castro— porque, sin él, cesan de existir; duran mientras se pronuncian. Pero la escritura comprime el tiempo. Un autor comprime años de trabajo en unas 300 páginas de las que el lector puede empaparse en un solo día.

Divergen también en el sentido del yo y la sociedad. El íntimo y reflexivo yo creado por la lectura difiere del papel social desinhibido que representan los participantes en una cultura desconocedora de la escritura. La escritura nos permite ver la sociedad humana en términos formales, vedados a una cultura oral que se limita a representar su propia historia.

Las formas oral y escrita de estar en el mundo se han enfrentado rencorosamente a través de la historia occidental, un rencor inducido por el prejuicio ilustrado contra las reglas orales. Ese profundo hiato en la comunicación y en la organización cultural que abrieron unas letras impresas fijadas sobre una superficie estática se salvará con una nueva educación, que orquesta las diferencias en una presentación más enérgica y universalizadora que la cultura escrita.

Si cambiamos nuestro gran angular cultural por un primer plano, observaremos mejor ese salto. En el mundo impreso, la idea y su expresión vienen a ser una misma cosa. El significado toma la forma de palabras; las palabras

generan el significado. Pero la clave digital que expresa palabras y números puede, si se ajustan los parámetros de expresión, generar también sonidos e imágenes. Esta variación paramétrica se alza en el centro de la expresividad digital, papel que nunca podría desempeñar en versión impresa. Las múltiples facetas de esta presentación digital constituyen el núcleo de la diferencia entre los dos medios, que nuestros esfuerzos en visualización y sonificación de los datos a duras penas han comenzado a explorar. Si pensamos en las prácticas institucionales basadas en la separación de palabras, imágenes y sonidos (departamentos de literatura, arte y música) podemos vislumbrar los profundos cambios que se producirán cuando los integremos.

Ser experto en el mundo digital significa tener pericia en el descifrado de complicadas imágenes y sonidos así como en las sutilezas sintácticas de las palabras. Por encima de todo, significa encontrarse a gusto alterando mezclas de palabras, imágenes y sonidos. Debemos saber qué clase de expresión se adapta a qué clase de conocimiento y adquirir pericia en presentar nuestra información por el medio que nuestra audiencia encuentre más inteligible.

RICHARD A. LANHAM es profesor emérito de la Universidad de California en Los Angeles.

El negocio de la información

¿Cuánto valdrán dos bits en el mercado de dígitos?

Hal R. Varian



Los avances en materia de ordenadores y redes informáticas inspiran imágenes de una futura “economía de la información” que pondrá al alcance de cualquiera, en cualquier tiempo y lugar, el acceso a gigabytes de datos de toda suerte. Pero la información ha sido siempre una mercancía difícil de tratar y, en algunos aspectos, los ordenadores y las redes hacen que los problemas de la compraventa y distribución de esta clase de bienes, en vez de resolverse, empeoren.

Para empezar, la abundancia misma de datos agranda la piedra con que tropieza el negocio de la información: la capacidad humana de comprender, que es limitada. Según Herbert A. Simon, premio Nobel de Economía, “qué consume la información es obvio: consume la atención de quienes la reciben. Por eso, la avalancha de aquélla empobrece la atención y crea la necesidad de que ésta se distribuya con eficacia entre la sobreabundancia de fuentes de datos que podrían agotarla”. La técnica de producción y distribución de información se torna estéril si no hay forma de situar, filtrar, organizar y resumir los datos. Los “gestores de la información” deberán conjugar la habilidad del especialista en informática, del bibliotecario, del editor y del experto en bases de datos para ayudarnos a descubrir y administrar la información. Esos nuevos profesionales trabajarán con programadores avezados en manipulación de la información —heredera de programas de indexación tales como Archie, Veronica y variopintos “rastrilladores de la Red Mundial” que prestan su ayuda a los navegantes de Internet.

La evolución misma de Internet plantea graves problemas. Privatizada ya esa red, varias compañías compiten por suministrar los elementos indispensables para que circule el tráfico entre las diferentes redes locales. Pero no se han desarrollado todavía prototipos de negocio que sean viables para la interconexión: quién deba pagar y cuánto por cada paquete de datos transmitido. Si se crean patrones normalizados de interconexión que abaraten y faciliten el transmitir información a través de redes independientes, florecerá la libre competencia. Si factores técnicos o económicos dificultan la interconexión hasta el punto de encarecer o enlentecer la transmisión de información a través de múltiples redes, los proveedores más fuertes podrán ofrecer rendimientos ventajosos e incluso aprovecharse de esa posición para eliminar a la competencia y monopolizar el mercado.

Parecidos problemas surgen a propósito de la mercancía informativa. Hay una creciente necesidad de establecer criterios normalizados para los formatos a que hayan de ajustarse la representación de textos, imágenes, vídeos y otras colecciones de datos, de modo que los datos de un proveedor sean accesibles a la programación de otro. Lo mismo que ocurre en las conexiones físicas, no está claro cómo asegurar que las compañías tengan los incentivos económicos adecuados para negociar unos patrones de aplicación general.

Además de pautas normalizadas de distribución y manejo de la información, debemos desarrollar también patrones para las transacciones económicas por vía de red: el trueque real de dinero por bienes digitales. Ya hay más de una docena de propuestas sobre el modo de dar seguridad a las transacciones financieras que se hagan a través de la Internet. Algunos de ellos, como el sistema DigiCash, incluyen complejas técnicas de cifrado; otros, como el empleado por First Virtual, son bastante más simples. Muchos de estos protocolos se realizan por vía de la propia programación; otros cuentan con un componente físico especial para proteger las transacciones electrónicas. Las tarjetas de crédito “inteligentes”, con sus microcircuitos incorporados, pueden desempeñar diversas tareas de autentificación y contaduría.

Sigue abierta la cuestión de tasar las mercancías digitales. ¿Alquilar o vender los datos? ¿Despachar paquetes de artículos, como en los periódicos y revistas, o permitir la compra de un artículo suelto? ¿Que los usuarios se suscriban a los servicios informativos o que puedan adquirir los datos cuando gusten? Y ¿cómo dividir el pago entre las partes

implicadas en la transacción, a saber, autores, editores, bibliotecas, compañía telefónica, etc.? Para ninguno de estos interrogantes hay una respuesta definitiva.

Siendo la técnica de la información algo intrínsecamente compartido, urge que se aborden la normalización y la interoperabilidad. El que cada cliente opte por un determinado elemento técnico —la Internet por ejemplo— depende mucho de cuántos sean los otros usuarios del mismo. Los nuevos instrumentos de la comunicación (aparatos de fax, vídeos y la misma Internet) acostumbran tener unos comienzos largos de escaso uso, a los que sigue un aumento exponencial, lo que supone que los cambios resultan mucho más baratos y fáciles de efectuar en las primeras etapas. Por otro lado, cuando una técnica ha logrado introducirse en una porción importante del mercado, puede ser muy difícil desalojarla. En la industria de los ordenadores se han hecho y se han fundido fortunas por una razón simple: la gente se muestra reacia a cambiar sus piezas de equipo o de programa por otras nuevas para no tener que dar por perdidos el tiempo que dedicaron a los viejos procedimientos y la posibilidad de compartir fácilmente sus datos con los demás usuarios.

Esta reflexión sobre la gestión, distribución y comercio de la información se eclipsa ante una cuestión de mayor calado, a saber, la de cuántos datos estarán dispuestos autores y editores a poner en forma electrónica al alcance del público. Si a la propiedad intelectual se la protege con demasiada laxitud, no habrá incentivos suficientes para producir nuevas obras electrónicas; a la inversa, si la protección es demasiado estricta, quizás impida el libre curso y el buen aprovechamiento de la información. Habrá que hallar una solución de compromiso entre quienes sugieren que toda información debería ser libre y quienes abogan por cobrar hasta el echar un vistazo a las ofertas del mercado.

Se han investigado diversas maneras de proteger los derechos de autor, que podrían servir para reforzar la regulación que se adopte. Aunque tal protección causa a menudo molestias a los usuarios y requiere equipamiento y programas adicionales, un acceso generalizado a la red y unos aparatos más potentes tal vez lleguen a dar cabida a una protección discreta y eficaz. Las utilidades de archivo podrían buscar quién debe a quién, y cuánto, por el uso de una información, y los documentos podrían cifrarse de suerte tal que pudiera castigarse la copia ilícita.

Ante tales problemas, podríamos preguntarnos si llegará a establecerse algún día el negocio de la información. Creo que hay razones para el optimismo. En los años ochenta, sólo en los EE.UU. surgieron 28.000 establecimientos de venta de informática. Cada semana más de 50 millones de personas acuden a ellos, donde pueden alquilar 100 gigabytes de información por dos dólares al día.

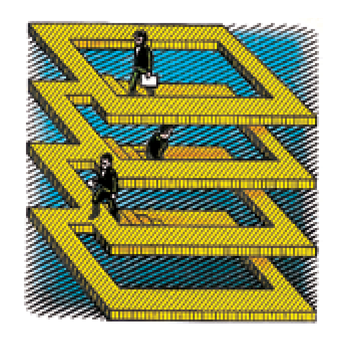
Aunque a estas videotecas de alquiler se les plantearon muchos de los mismos problemas de normas, protección de la propiedad intelectual y precios con que se enfrenta hoy Internet, su negocio pasó de la nada a 10.000 millones de dólares sólo en una década. Dentro de otros diez años, quizá las instituciones económicas de la economía de la información se conviertan en una parte no menos corriente de nuestra vida diaria.

HAL R. VARIAN es decano de la Escuela de Sistemas de la Universidad de California en Berkeley.

El nuevo puesto de trabajo

Las técnicas de la información evolucionan más deprisa que la conducta humana

Shoshana Zuboff



Según el departamento de Comercio estadounidense, 1990 fue el primer año en que la inversión de capital en infraestructura de la información —o sea, en ordenadores y en equipo de telecomunicaciones— superó a lo invertido en los demás sectores de la infraestructura industrial del país. Estudiosos y comentaristas acuden a esas cifras para aseverar que la economía ha echado ya firmes raíces en la era de la información. No se cansan de declarar que el "negocio de la información" ha reemplazado al negocio industrial dominante a lo largo de nuestro siglo. Disiento.

En el negocio de la información, constituye ésta el principal recurso para crear riqueza. La construcción de tal negocio requiere más que una mera proliferación de ordenadores y de redes de datos: exige dar un nuevo sentido a lo que significa ser miembro de una organización y crear un nuevo contrato social que vincule entre sí a los miembros de una empresa de un modo hasta ahora inédito. La verdad es que las pautas de moralidad, relación laboral y sentido de empresa evolucionan mucho más despacio que la técnica. Y, sin esas pautas, el negocio de la información viene a ser algo tan ridículo como el emperador del cuento, desnudo y mofado.

Una ojeada a la historia aclarará la cuestión. A comienzos del siglo XX se inventó un sistema de organización —la jerarquía funcional— para que los negocios hicieran frente a las exigencias de una producción cada vez mayor y un abaratamiento creciente de los costes unitarios. Se dividieron los procesos en razón de su función: fabricación, ingeniería, ventas, etc. Asimismo, se introdujeron la fabricación en serie, la cadena de montaje, la profesionalización de la gestión, la proliferación de mandos intermedios para estandarizar y controlar las operaciones, incluidas las tareas contables y administrativas. Fueron medidas acertadas, que caracterizaron el arquetipo laboral moderno.

Esa jerarquización se basaba en la premisa de que la complejidad debía alejarse de las tareas de inferior nivel,

reservándola para los rangos directivos. Obreros y oficinistas vinieron a estar cada vez menos implicados en el negocio general de la empresa, conforme se les acotaba su tarea y se les quitaba la posibilidad de innovar o enjuiciar. La automatización terminó por anular la iniciativa. El director, por contra, devino el guardián del conocimiento, centralizado, de la empresa. Era, revestido de autoridad, la persona capaz de recibir, interpretar y comunicar órdenes basadas en el dominio de la información. Todavía se acepta que una jerarquía gestora que opere así refleja una razonable división del trabajo.

En el nuevo mundo feliz del negocio de la información, este sistema resulta inviable. La idea de un mercado de masas ha cedido el paso a un mercado altamente especializado y a menudo saturado de información, en el que las empresas se han de distinguir por el valor adicional que ofrezcan a las demandas de los clientes. Las técnicas informáticas proporcionan los medios para producir ese valor con rapidez y eficiencia.

Hacerlo así significa usar la moderna infraestructura de la información para enfrentarse a las complejidades de un negocio sin tener que depender de ningún cuadro directivo central. Resulta más eficaz habérselas con la complejidad de los problemas donde y cuando empiecen a plantearse: en el diseño, en la fabricación o en la venta. Este enfoque es ahora posible gracias a la capacidad de las técnicas informáticas, que pueden transformar el trabajo en cualquier nivel organizativo. Se supuso, en un comienzo, que la entrada de los ordenadores en las oficinas y otros puestos de trabajo consolidaría la automatización. No hay tal. La automatización ocultaba a los empleados las operaciones generales de la empresa; en cambio, la técnica de la información tiende a hacerles partícipes de las mismas. Cualquier empleado puede hacerse una rápida idea de conjunto de la totalidad del negocio y advertir detalles casi infinitos de cada uno de sus aspectos.

Para designar esa acción creé el neologismo “informatizar”. En el nuevo negocio, las técnicas incorporadas informatizan tanto como automatizan: abren el conocimiento a quien ha adquirido la capacidad de acceder al mismo y comprenderlo. Si la mecanización diluía la complejidad de las tareas, las técnicas informáticas aumentan el contenido intelectual del trabajo en todos los niveles. El trabajo depende ahora de la capacidad de comprender la información, de responder a ella, de manejarla y de crear valor a partir de la misma. Así, en el puesto de trabajo informatizado, las operaciones, para ser eficaces, requieren una distribución más equitativa del conocimiento y de la autoridad. Para transformar en riqueza la información, hay que dar a más miembros de la empresa las oportunidades de conocer más y de hacer más cosas.

Para sacar ellas mismas partido de las oportunidades, las empresas deben acabar con la vieja división del trabajo. Explotar el entorno informatizado significa abrir la base de información a todos, asegurar que cada empleado tenga el conocimiento, las habilidades y la autoridad precisas para habérselas con la información productivamente. Un contrato social bien actualizado tendría que redefinir quiénes trabajan, qué pueden conocer y qué pueden hacer.

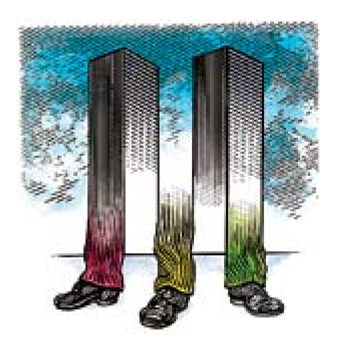
El hacer realidad lo que promete una economía de la información depende ahora de que se desmantele la mismísima jerarquía de directivos que antaño engrandeció las empresas. Sólo entonces, porque habremos acertado a vestirle, podrá el Emperador librarse del frío y volver a entrar entre nosotros.

SHOSHANA ZUBOFF ocupa la cátedra Benjamin y Lil-lian Hertzberg de la Universidad de Harvard.

Limitaciones de la técnica

La técnica no nos dará a todos salud, riqueza y poder

Robert W. Lucky



Seguramente el lector recuerda alguna exposición, una muestra o un parque temático que pintaban un espléndido futuro en el que gentes risueñas se reunían en torno a grandes pantallas de televisión dentro de casas con energía solar. Mientras la familia prototipo disfrutaba del entretenimiento electrónico, zumbaban serviciales en el trasfondo las tostadoras, lavadoras y demás electrodomésticos “inteligentes”. Hasta el perro vigilaba con gran atención luciendo una leve sonrisa de superioridad.

Esa visión me retrotrae treinta años atrás, a la Feria Mundial de 1964. Se ilustraba allí un futuro en el que se habrían eliminado los trabajos molestos, todo el mundo gozaría de salud y riqueza y nuestra principal preocupación habría llegado a ser la de cómo llenar las horas de ocio. La vida se había vuelto fácil y placentera, y todo ello lo habían hecho posible la ciencia y la técnica. Como la mayoría de los visitantes, supongo, me sentí impregnado de la euforia y creí a pies juntillas en sus promesas.

¿Dónde se halla hoy aquella familia arcádica de la Feria Mundial? ¿Qué les ocurrió a aquellas gentes de plástico, con sus hogares y vidas también de plástico? A buen seguro que su descripción no corresponde a ninguna persona de cuantas veo en mi desplazamiento diario en metro. Por su aspecto, diríase que éstas han tenido que sufrir incesantes trabajos pesados. Se las podría dividir en dos categorías: la de los que no tienen ningún tiempo libre y

la de los que sólo tienen eso, tiempo libre. Si sus problemas había de resolvérselos la técnica, parece ser que la técnica ha fracasado.

Pero, aun considerando esta posibilidad, he de rechazarla. Pues lo que hemos llevado a cabo en los últimos treinta años rebasa con mucho los proyectos más fantásticos: nos hemos paseado por la Luna; hemos obtenido imágenes de los confines del sistema solar y con los telescopios orbitales estamos escudriñando los orígenes mismos del universo; hemos cubierto la tierra de cables de fibra óptica y establecido toda una red planetaria de comunicaciones digitales de alta velocidad; hemos creado micropastillas que contienen millones de transistores y a tan poco precio que muchos hombres podrían tener ordenadores más potentes que los grandes artefactos iniciales; hemos descifrado el ADN y examinado los sillares básicos con que se construye la vida. No, la ciencia y la técnica no fracasaron. Lo que ocurre es que no bastó con ellas.

Hay una idea simplista, reflejada en muestras y exposiciones mundiales, según la cual podemos inventar el futuro. Nada más alejado de la realidad. Esos pasmosos desarrollos científicos de las pasadas tres décadas no les han servido de mucho a mis compañeros de viaje en el metro. Las preocupaciones de la vida diaria y los más profundos problemas de la humana condición parecen resistirse a los rápidos avances técnicos.

Si pudiésemos volver a 1964 y crear retrospectivamente una exposición del futuro, ¿qué incluiríamos ahora en ella? Sin duda que nos merecerían mención los logros científicos, pero los enmarcaríamos en un contexto social. En nuestra muestra imaginaria asombraríamos a los incrédulos visitantes prediciéndoles el final de la guerra fría y la desintegración de la Unión Soviética. Diríamos que los misiles atómicos dejarían de aterrorizar a la gente, pero que habría, por desgracia, muchas guerras "menores" y multitud de sangrientos conflictos raciales y étnicos.

Informaríamos que se extendería por toda la Tierra una nueva enfermedad del sistema inmunitario. Hablaríamos de la contaminación que agobia a las grandes urbes y diríamos que los intereses ambientales orientarían la política de los gobiernos e impedirían el desarrollo de la energía nuclear. La desnutrición, el analfabetismo y la distancia entre ricos y pobres serían mayores que nunca.

Hace unos años fui invitado a una mesa redonda en televisión, moderada por un periodista de agresividad rayana en la impertinencia. Los organizadores de la sesión me aseguraron la seriedad de la misma, pues querían dar al programa una nueva sensación de respetabilidad. La sesión se dedicaría a avizorar el futuro a través de las miradas de expertos. Aún no sé cómo, pero el caso es que, a pesar de las advertencias del jefe de relaciones públicas de mi compañía, acabé frente a una cámara de televisión rodeado de especialistas en pedagogía, medicina, finanzas, criminología y cuestiones ambientales. Yo era "el tecnólogo".

El pedagogo dijo que el analfabetismo iba en aumento y que las calificaciones de los exámenes eran cada vez más bajas. El médico habló de que el progreso en la lucha contra las enfermedades mortales se había estancado. El experto en finanzas predijo una quiebra mundial de los mercados. El criminólogo adujo estadísticas sobre el aumento de la criminalidad, y el ecologista aseguró que la contaminación estaba invadiendo todo el mundo y que era imparable. Todos estuvieron de acuerdo en que el futuro sería negrísimo.

Cuando me tocó el turno, yo dije algo como que la técnica estaba bien y que gracias a ella se haría más fácil el trabajo y más ameno el tiempo libre. Creo que dije también que todos tendríamos magníficos televisores. Recuerdo cómo me miraron los demás invitados. "¿Es creíble semejante ingenuidad?" El rostro del moderador se apesadumbró; le convencían más las predicciones funestas. Yo insistí, aunque con débil obstinación, en que gracias a la técnica la vida sería mejor en el futuro.

Todavía hoy me sonrojo al recordar mi torpeza. Pero aún sigo creyendo que las predicciones optimistas contienen un germen de verdad. El continuo ir desvelando los misterios de la naturaleza y el desarrollo de la técnica elevan el nivel en que la vida, con todos sus vaivenes, se mantiene a flote. Pero la eficacia de la ciencia y de la técnica depende de la complicada, caótica y resistente armazón de la sociedad. Aunque por sí mismas no pueden mejorarle la vida a todo el mundo, la ciencia y la técnica crean una fuerza que, a mi entender, se orienta sin cesar, como el tiempo o la entropía, en una dirección: hacia la mejora de la calidad de vida.

Cuando visito los antiguos castillos de Europa, me imagino el son de las trompetas y el boato y la gloria que brillarían en otros tiempos entre aquellas hoy desmoronadas ruinas. Pero en seguida su humedad y su frío me hacen tiritar y advierto también su falta de higiene. La vida actual es indiscutiblemente mejor, y no hay razón para pensar que no se vaya a seguir mejorándola en el futuro.

El progreso general está asegurado, mas la ciencia y la técnica actúan dependiendo de factores sociales que determinan su utilidad en un momento dado y su efecto último. Esta interacción es especialmente notoria en la evolución del "ciberespacio". Resulta irónico que tal término lo acuñara William Gibson en *Neuromancer*, novela que describe un futuro en el que las fuerzas de un mal computerizado habitarían en un siniestro mundo, tejido de realidad virtual. La visión pesimista de Gibson es del tono de las de mis televisados interlocutores. En realidad, empero, el ciberespacio es un ámbito en el que se están desarrollando comunidades y negocios nuevos, y hay muchos indicios de que a cuantos lo comparten les beneficia.

En congresos y conferencias los investigadores científicos y los ingenieros hablan de la evolución de la infraestructura informática. Pero, ¿de qué hablamos en realidad? A buen seguro que no de la técnica. Hablamos de ética, derecho, política y sociología. Reconociendo esta tendencia, un amigo se preguntaba pensando en voz alta si, puesto que hoy los técnicos suelen debatir cuestiones legales, no empezarán los juristas a discutir sobre la técnica. En mi siguiente encuentro con juristas pregunté si tal era efectivamente el caso. Me miraron asombradísimos. "¡Claro que no!", dijo por fin alguno. De hecho, los juristas se sienten tan cómodos en el ciberespacio como los científicos. Es un invento social. Los problemas que todos nosotros discutimos versan sobre el acceso universal, los derechos de propiedad intelectual, la privacidad, la jurisdicción gubernamental y otros así. La técnica fue la posibilitadora, pero estas otras cuestiones determinarán el valor último de nuestro trabajo.

ROBERT W. LUCKY, doctor en ingeniería eléctrica, es vicepresidente de los Laboratorios Bell.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Sucio robo en Aldeatétrica

Holmes estaba haciendo las maletas cuando llegué a su domicilio. "Watson, tenemos que ir a Aldeatétrica. El duque corre grave peligro. Luis Oízo, antiguo mayordomo de la Alquería de Aldeatétrica encarcelado por asesinar a una de las doncellas, se ha fugado."

Durante el viaje le eché un vistazo a un pequeño volumen de enigmas matemáticos. "Mire, Holmes, aquí tenemos un buen rompecabezas. Un hombre está en el centro de un lago, y en eso cae una espesa niebla. ¿Cuál es el camino más corto que puede tomar para llegar a tierra? Al parecer, nadie lo sabe. Pero se cree que el camino más corto es el que va en línea recta durante un tiempo, después gira a la izquierda, sigue un poquito en línea recta, da la vuelta y después vuelve a ir derecho."

"Fascinante", respondió Holmes con sarcasmo. "Mire. Ya hemos llegado."

El duque no tenía buen aspecto. "Holmes, me temo que han robado el chivo de la Alquería." El animal estaba fundido en bronce y medía casi un metro. Aunque su valor artístico era nulo, contenía una gaveta secreta lleno de documentos delicados.

El duque nos condujo hasta un sótano pequeño, con fuerte tiro de aire. "Allí", dijo, señalando hacia una gran caja fuerte que estaba en un rincón. Holmes estudió el sumidero, examinó la rejilla de ventilación e inspeccionó las cerraduras de la puerta del sótano y de la caja. Se puso de rodillas y encontró un pedazo de papel de envolver. Olisqueó el aire y se puso en pie.

"La cosa está clara, Señoría. El ladrón entró y salió por el conducto de ventilación. Descerrajó la caja y se llevó el chivo. Como el chivo no podía pasar por el conducto, lo ató a un flotador inflable de goma y lo dejó caer en las alcantarillas, para que se alejase flotando, con el fin de recogerlo luego a cierta distancia de aquí.

”Pero el flotador debió pincharse. El chivo no tuvo tiempo de alejarse flotando; se hundió y bloqueó los desagües, como el olor bien nos dice. Los documentos están en el sumidero, pero no podemos localizarlos desde este lado; el pozo de desagüe es demasiado profundo. Hemos de penetrar en el alcantarillado por un lugar más adecuado."

"Hay un conducto que pasa a través del césped del jardín delantero y acaba en los sótanos", indicó el duque. "En verano resulta fácil de localizar, porque la hierba que crece sobre él tiene distinto color. Pero ahora está cubierto de nieve. Si la memoria no me falla, pasa a unos 100 metros de la estatua de la ninfa acuática."

"Tenemos que abrir una zanja que lleve hasta ese desagüe, determinar su salida y recuperar el chivo antes de que lo haga Oízo."



"¡Hemos de darnos prisa en cavar!", apremió el duque.

"Y en la dirección correcta", tercié yo. "De lo contrario podríamos no encontrar nunca el desagüe."

"Lo que necesitamos es averiguar cuál es la zanja de longitud mínima que intercepta con certeza a toda línea recta que pase a 100 metros de la estatua de la ninfa acuática."

"Podríamos abrir una trinchera circular de 100 metros de radio", propuso el duque.

"Cuya longitud sería de unos 200π metros, o sea, unos 628 metros", calculó Holmes con presteza. "¿No se puede trabajar menos?"

"¿Qué le parece una línea recta de 200 metros de longitud, que sea un diámetro del círculo del duque?", ofrecí yo.

"Excelente, Watson, si no fuera porque con semejante plan se pierden muchas posibles posiciones del desagüe."

"De acuerdo, de acuerdo. Tomemos entonces dos diámetros perpendiculares, cuya longitud total será de 400 metros."

"El problema sigue siendo el mismo, Watson. Matemáticamente hablando, estamos buscando la curva de longitud mínima que corte a todas las cuerdas de un círculo de radio *r* igual a 100 metros. Una cuerda es cualquier línea recta que corta al círculo en dos puntos."

"¡Pero, Holmes, piense en cuantísimas cuerdas tendríamos que considerar!"

"Sí, sería bonito poder simplificar las cosas. ¡Ah, ya lo tengo! En realidad, Watson, basta considerar las rectas tangentes al círculo. Estas líneas cortan al círculo en un punto de su perímetro. Después de todo, una curva que corte a todas las tangentes habrá de cortar necesariamente a todas las cuerdas.

”Tomemos un cuerda cualquiera y fijémonos en las dos tangentes que son paralelas a ella. La curva corta a una de las tangentes en el

punto B y a la otra en C. Por ser continua, la parte de la curva que conecta B con C habrá de cortar la cuerda.” Se acarició el mentón. “Casi lo tengo, pero sé que mi razonamiento tiene un pequeño fallo.”

“Holmes, no tenemos tiempo para ocuparnos de los detalles. En términos generales, ¿en qué consiste su idea?”

“Verá, Señoría, hay una clase de curvas que automáticamente cortan a todas las tangentes, a saber, las que arrancan y terminan en lados opuestos de la misma tangente, sea envolviendo al círculo, permaneciendo en su exterior o sobre él. Las llamaré ‘fajas’, porque sujetan una tangente al círculo.”

“Siga, siga.”

“No hay dificultad en hallar la faja más corta. Observemos, ante todo, que tal faja ha de tocar al círculo en algún punto. De no ser así, podríamos ceñirla más hasta que lo hiciera y entonces sería más corta. Supongamos que cortase por primera vez al círculo en el punto B y que la tocase por última vez en el punto C. Entonces los tramos AB y CD tienen que ser líneas rectas. De lo contrario, la cincha podría acortarse enderezando estos segmentos. Además, BC tiene que ser un arco simple del círculo, por razones similares.”

“Me parece que las rectas AB y CD han de ser tangentes al círculo”, opiné yo. “Si no lo fueran, la curva podría acortarse todavía más llevando B y C a posiciones en las que fueran tangentes.”

“Desde luego. Pero, ¿dónde habrían de estar situados los puntos A y B? Me parece que tanto AB como CD tendrían que ser perpendiculares a la tangente AD. Pues si no formasen con ella ángulos rectos podríamos hacer oscilar la faja hasta que lo fueran, y en tal caso la faja volvería a ser más corta.

“¡Eso es!”, exclamé. “El arco BC es un semicírculo. ¡Hemos hallado la curva más corta!”

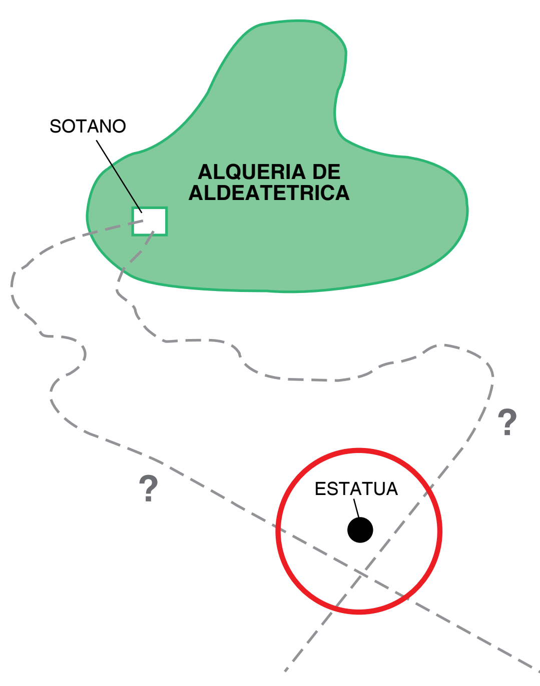
“Desdichadamente, sólo hemos encontrado la faja más corta”, opuso Holmes, frunciendo el ceño. “Aunque me resulta difícil imaginar de qué otra forma podría ser más corta una curva que cumpliera los requisitos pedidos.”

“Puede que no esté todo perdido”, dije yo. “Después de todo, ¿qué longitud tiene la faja más corta?”

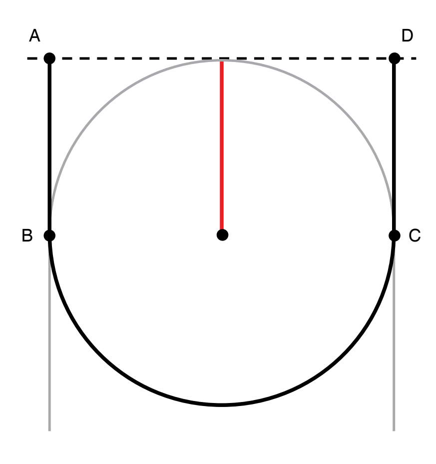
“$(2 + \pi)r$, lo que viene a ser unos 514 metros en nuestro caso.”

“Lo cual ahorra 89 metros con respecto a mi plan”, exclamó el duque.

Mientras los obreros excavaban, Holmes y yo continuamos buscando curvas todavía más cortas, pero no encontramos ninguna. “¡Holmes! ¿Se acuerda usted de mi libro?” Lo extraje del bolsillo. “Escuche. ‘El camino



1. Posibles trazados de la alcantarilla, que pasan por el círculo señalado



2. La zanja mínima que cortará con certeza al desagüe consiste en un semicírculo (BC) y dos tangentes (AB y CD)

más corto que corta a todas las cuerdas de un círculo de radio r está formado por dos segmentos rectilíneos paralelos, de longitud r, más un semicírculo.’“

“Justamente lo que yo deduje. He de confesarle, Watson, que juzgué mal la utilidad de su librito. Por curiosidad, ¿cómo se sabe que el camino propuesto es el más corto?”

“Ha sido demostrado sin la menor duda por varios matemáticos; empero, sus demostraciones son endiabladamente complejas. Sería del mayor interés que alguien descubriera una demostración breve y sencilla.”

“Tal vez yo...” empezaba a decir Holmes cuando el duque dejó escapar un grito. Sus obreros habían localizado el desagüe.

Holmes echó una ojeada a su longitud. “Encontraremos la salida —y al ladrón— más allá de esa espesura que hay allá.”

Nos ocultamos entre los árboles y nos dispusimos a esperar. El sol acababa de ponerse cuando oímos pasos. Vimos una silueta enmascarada y Holmes la apresó. “Vamos a ver quién eres”, declaró. “Como ya deduje al principio, es.... Oiga, ¿quién es usted?”

“¡Dios mío! ¡Es Lucinda, la doncella!” exclamó el duque. “¿Qué estás haciendo aquí?”

“Se lo suplico, Señoría. Ayer tuve que ir al sótano. La puerta estaba cerrada con llave, así que me colé por la parrilla de ventilación. La caja fuerte estaba abierta y vi que dentro había un chivo antiguo y muy curioso. Quise sacarlo para verlo mejor, pero era muy pesado y se me cayó por el sumidero. Me entró miedo. Así que cerré la caja fuerte y salí. Tenía la intención de devolverlo a su sitio una vez que yo... Sea como fuere, yo me disponía a reptar por dentro del desagüe para buscarlo cuando este caballero” —le dirigió a Holmes una mirada enternecedora— “se abalanzó sobre mí”.

“Así que el chivo de Aldeatétrica está en el fondo del pozo negro”, murmuró el duque para sí. “Tengo además una zanja de 500 metros en el césped de mi jardín y por si fuera poco, Oízo sigue por ahí a sus anchas.” Le dirigió a Holmes una mirada asesina.

“Es cuestión de pura deducción lógica”, dijo Holmes. “Una vez eliminado lo imposible, lo que queda, por improbable que sea...”

“¡Sí, Holmes, sí! ¡Continúe, continúe!”, le supliqué.

“— sigue siendo improbable”, concluyó. “Pero no cite estas palabras mías.”

“Mis labios están sellados.”

Pero no mi cuaderno de notas. Los biógrafos, después de todo, han de ganarse la vida.

Apuntes

Juntos, pero no revueltos

Por reproducirse en colonias, se suponía que los machos de foca gris eran mamíferos poligínicos que pugnaban por crearse su propio harén. Sin embargo, el análisis genético molecular ha revelado la presencia de numerosos hermanos plenos, es decir, que tienen los mismos progenitores. De lo que se infiere que las focas acostumbran aparearse antes con el macho de su preferencia.

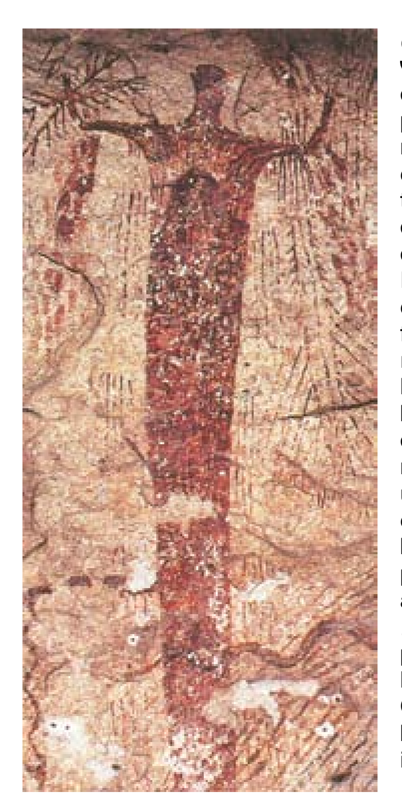
En cuarentena

Los factores ambientales constituyen un socorrido comodín o un refugio de frustraciones cuando no se dispone de pruebas mejor fundadas. Perderán su pretendida solidez cuando proliferen trabajos como el realizado a propósito de la esclerosis múltiple. Tras un rastreo de 15.000 afectados, se ha comprobado que los hermanos de adopción —que conviven bajo el mismo techo— no corren mayor riesgo de contraer esa enfermedad que el común de la población. El dato contradice la tesis estampada en los manuales, según la cual la esclerosis múltiple es una enfermedad autoinmunitaria causada por la interacción entre factores genéticos y ambientales.

Retrato de asteroide

Debido a su exiguo tamaño óptico, resulta difícil obtener imágenes de los asteroides que se asoman a la órbita terrestre. Pero podemos apoyarnos en las observaciones de radar (esto es, en la medición de la distribución de la intensidad del eco) para crear un retrato cabal de esos cuerpos celestes. Así se ha logrado ya perfilar la figura de Toutatis, que cruza la órbita de nuestro planeta a 3.600.000 kilómetros, unas 9,4 distancias lunares. Por lo pintado, el asteroide presenta una forma bifurcada sembrada de cráteres.

Genes artísticos



Si no es fácil datar piezas de arte antiguo, resulta endiabladamente difícil conocer los ingredientes de la paleta del pintor. O resultaba. La técnica del ADN recombinante acaba de entrar en liza, y se propone identificar tejido animal en unas pinturas rupestres de 4000 años de antigüedad. Un grupo dirigido por Marian Hyman y Marvin W. Rowe, de la Universidad A&M de Texas, examinó figuras semejantes a la de la fotografía, que se encuentran cerca del río Pecos, en Texas. Mediante el análisis de fragmentos de ADN conservado bajo una capa de minerales, el equipo descubrió que los pigmentos contienen material procedente de un mamífero ungulado. En aquella zona de Texas, estos animales serían probablemente bisontes o venados. Esta investigación puede, en último término, ayudar a los arqueólogos a comprender las imágenes: ¿Se utilizaba el tejido de venado para pintar sólo venados? ¿Formaba parte la pintura de una práctica cinegética? Como siempre, la solución de un problema que se precie comporta nuevos interrogantes.

SASHA NEMECEK

Paleodieta vegetal

La colonización de la tierra por artrópodos y plantas vasculares precedió a la de los anfibios en 50 millones de años. Durante ese lapso temporal aconteció un singular episodio de la historia de la vida, pertinente al establecimiento de los primeros ecosistemas terrestres: la primera prueba fósil de herbivorismo. Se han descubierto coprolitos (heces fósiles) en rocas del Silúrico superior (hace 412 millones de años) y Devónico inferior (hace 390 millones de años). Esos coprolitos constan de esporas sin digerir de plantas terrestres.

Dolomita bacteriana

La dolomita mineral es un carbonato de magnesio-calcio, $CaMg(CO_3)_2$. Abunda más en rocas antiguas que en suelos recientes. Se ignora el motivo, desconocimiento que se torna perplejidad con el hallazgo de dolomitas en lugares modernos. Para robarle el secreto a la naturaleza se realizaron vanos esfuerzos por precipitarla en el laboratorio, a bajas temperaturas. Así, hasta que se ha observado la intervención de bacterias anaeróbicas en una laguna costera del Brasil. Los ensayos posteriores con bacterias del grupo *Desulfovibrio* han logrado la precipitación de una dolomita portadora de hierro. Según parece, las bacterias saltan la barrera cinética de la nucleación dolomítica y explican la distribución desigual del mineral en el registro geológico.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



DESEQUILIBRIOS DE LA ECONOMIA ESPAÑOLA, por Antonio Pulido

La economía es una ciencia que se enfrenta a un momento dinámico, complejo y cambiante. Por ello, a nadie debiera extrcularle que no pueda dar soluciones exactas, ni alcanzar equilibrios estables como en los problemas físicos.

LAS COMPAÑERAS DE LAS ESTRELLAS JOVENES, por AJan P. Boss

El sorprendente descubrimiento de que hasta las estrellas más jóvenes aparecen en grupos de dos o tres ha conducido a una revisión del conocimiento sobre el nacimiento de los sistemas estelares.

COMPUTACION MECANOCUANTICA, por Seth Lloyd

Si lograran construirse, los ordenadores mecanocuámicos alcanzarían lo que ninguna computadora ordinaria puede hacer:

VOLADURA CONTROLADA DE EDIFICIOS, por J. Mark Loizeaux y Douglas K. Loizeaux

La detonación de peque1ias cantidades de explosivos estratégicamente colocados puede demoler un edificio en cuestión de segundos.

LOGICA MOLECULAR DE LA OLFACCION, por Richard Axel

Los mamíferos reconocen muchísimos olores, algunos de los cuales instan respuestas inmediatas. La investigación experimental acaba de sacar a la luz el papel que desempe1lan nariz y cerebro en la percepción de los aromas.

LOS CUADERNOS DE LABORATORIO DE THOMAS EDISON, por Neil Baldwin

Pruebas visibles y literales, no manipuladas, de su imaginación, los cuadernos de Edison constituían los talismanes escondidos de la carrera del inventor.

¿PUEDEN CAUSAR CANCER DE MAMA LOS ESTROGENOS AMBIENTALES?, por Devra Lee Davis y H. Leon Bradlow

Los autores de una sugestiva hipótesis nos detallan sus razones para sospechar de la participación de ciertas sustancias químicas del entorno, que remedan a la hormona, en el desarrollo de muchos casos inexplicados de cáncer de mama.

CIENCIA PERDIDA DEL TERCER MUNDO, por W. Wayt Gibbs

En el mundo subdesarrollado, muchos investigadores se sienten atrapados en un círculo vicioso de desatención y prejuicios, que condenan al olvido óptimos trabajos científicos.

